

silama) bilo kao okvirni sistemi i gredni nosači (na štapove djeluju i druga, većinom kombinirana naprezanja: savijanje, torzija, smicanje). Mnogo se rjeđe primjenjuju statičko-konstruktivni sistemi sastavljeni od ploča (kolovozi mostova), ljsusaka (rezervoari) i visokostijenih nosača (silosi i bunkeri). Specijalne sisteme čine viseće, spregnute i prednapregnute konstrukcije.

Razlikuju se dvije osnovne vrste izvedbe čeličnih konstrukcija: zakivana izvedba i zavarena izvedba.

Zakivanom smatra se konstrukcija u kojoj se svi elementi čelične konstrukcije, ili bar njihov pretežni dio, izvode tako da se čelični valjani proizvodi spajaju u cijelinu zakivanjem. Zavarenom smatra se konstrukcija u kojoj se ti spojevi izrađuju zavarivanjem. Na taj način izradeni elementi spajaju se među sobom u konstrukciju kao cijelinu obično na gradilištu ili drugom mjestu eksploracije izvedbom priključaka i nastavaka, tzv. montažnim zakovicama odn. montažnim varovima, s time da zavarene konstrukcije mogu u cijelosti ili djelomično imati i zakivane montažne spojeve. Ovi montažni spojevi često se izvode, iz ekonomskih i tehničkih razloga, i viječnom vezom od obradenih i neobradenih vijaka, a također — u novije vrijeme — vezom od vijaka s visokom silom pritezanja koja osigurava tarni spoj. (V. Zakivanje i Vijci u članku *Elementi strojeva* i članak *Zakivanje*.)

Do prije tridesetak godina gotovo se isključivo primjenjivala zakivana izvedba nosivih čeličnih konstrukcija. Taj način izvedbe diktirao je također asortiman profila valjanih proizvoda i konstruktivno oblikovanje elemenata i spojeva, i postavljao je odredene zahtjeve na standardizirane kvalitete čeličnog materijala. Tretman dimenzioniranja, prilagođen zakivanoj izvedbi, dosegao je praktičku granicu potrebe daljnog usavršavanja. Sve jačim prodiranjem zavarene izvedbe u posljednjih tridesetak godina postepeno je eliminirana zakivana izvedba, te se može ustvrditi da se danas sigurno daleko preko 90% svih nosivih čeličnih konstrukcija izgrađuje u zavarenoj izvedbi. Ovo širenje zavarene izvedbe i usavršavanje postupaka zavarivanja prati postepeno i proizvodnja novih oblika valjanih profila prilagođenih potrebama konstruktivnog oblikovanja i izvedbe zavarenih elemenata (zatvoreni profili, lamele s nosom itd.), kao i proizvodnja čelika s posebno garantiranim osobinama (žilavosti). Tretman kod dimenzioniranja zavarenih konstrukcija već dobiva jasne konture kroz niz laboratorijskih ispitivanja i teoretskih obrada rezultata kao podloga za nove propise i uputstva.

Tendencija razvitka nosivih čeličnih konstrukcija usmjerena je prema: potpunom eliminiranju zakivane izvedbe; usavršavanju postupka zavarivanja; širokoj primjeni vijaka s visokom silom pritezanja; daljnjoj primjeni lakih konstrukcija uz upotrebu hladno valjanih profila koji se lako proizvode u širokom asortimanu; proizvodnji visokovrijednih čeličnih materijala koji bi uslovili i širu primjenu prednapregnutih konstrukcija.

S tom tendencijom razvitka postavljaju se međutim iz razloga ekonomičnosti i sigurnosti čeličnih konstrukcija sve strožiji zahtjevi na tretman kod dimenzioniranja, i to kako zahtjevi za tačnijim metodama proračuna uz egzaktnu obradu problema stabiliteta, zamora materijala i dinamičkog proračuna konstrukcije, tako i za neophodnim utvrđivanjem kriterija za osiguranje protiv pojave krtog loma.

Velika prednost čeličnih konstrukcija s obzirom na zahtjeve savremenog gradevinarstva je tvornička izrada laganih elemenata s mogućnošću sigurne provedbe montaže i kod loših atmosferskih prilika, kao i jednostavna mogućnost eventualno potrebnog naknadnog ojačanja ili adaptacije pri promjeni uslova eksploracije objekta.

Nedostatak čeličnih konstrukcija je potreba antikorozione i eventualno protupožarne zaštite.

Gubitak čeličnog materijala uslijed rđanja nezaštićene površine zavisi od količine vlage i zagadenosti atmosfere. Ovaj gubitak može iznositi, izražen srednjom dubinom izjedanja jednog lica rđom, od 0,3 mm za 100 godina u pustinjskoj klimi do 17 mm za 100 godina u zagađenoj atmosferi industrijskih predjela. Zaštita čeličnih konstrukcija od korozije vrši se premazima i metalnim zaštitnim slojevima (v. *Korozija metala*).

Protupožarna zaštita čeličnih konstrukcija potrebna je samo tamo gdje se može očekivati dulji i intenzivniji požar koji bi uzro-

kovao zagrijavanje elemenata čelične nosive konstrukcije preko 300°C . Do ove granične temperature mehaničke osobine čelika ostaju približno konstantne, a kod zagrijavanja preko nje čvrstoča, granica razvlačenja i modul elastičnosti naglo opadaju tako da se npr. na 600°C čvrstoča čelika smanjuje ispod 50% prvobitne vrijednosti. Protupožarna zaštita elemenata čelične konstrukcije provodi se u zavisnosti od požarnog opterećenja (količine sagorivog materijala preračunate po kaloričnoj vrijednosti u kilograme drvene mase po četvornom metru tlocrta prostorije) i efikasnosti protupožarnih mjera (ugradbe protupožarnih alarmnih uređaja, brzine intervencije vatrogasne službe, ugradbe automatskih uređaja za suzbijanje požara, brzine evakuacije objekta itd.). Sama zaštita provodi se nanošenjem sloja materijala termički loše provodljivosti oko čeličnog elementa. Efikasnost ove zaštite izražava se vremenom potrebnim da se čelični element izložen vatri normiranih intenziteta zagrije do kritične temperature. Noviji propisi za protupožarnu zaštitu čeličnih konstrukcija utvrđuju vrednovanjem (bodovanjem) požarnog opterećenja i efikasnosti protupožarnih mjera potrebu odgovarajućeg zaštitnog sloja. Smatra se da do veličine požarnog opterećenja od 25 kg/m^2 čelična konstrukcija može ostati nezaštićena.

Regulativ opterećenja, proračuna, konstruiranja, izrade, montaže, održavanja i eksploracije čeličnih nosivih konstrukcija obuhvaćen je u tehničkim propisima koje izdaje nadležni državni organ kako bi osigurao određeni stepen sigurnosti konstrukcije i standardnost izvedbe. (U SFRJ »Tehnički propisi za noseće čelične konstrukcije« — do sada samo djelomično obrađeni — Sl. list 41/1964 i 6/1965). U okviru Evropske konvencije za metalne konstrukcije obrađuju se opći prijedlozi iz područja ovog regulativa koji služe kao podloge nacionalnim tehničkim propisima.

Ostala problematika dispozicionih rješenja, konstruktivnih sistema, tretmana kod dimenzioniranja, konstruktivnog oblikovanja, izvedbe i montaže čeličnih nosivih konstrukcija poklapa se s općom problematikom metalnih konstrukcija (v. *Metalne konstrukcije*). V. Milčić

ČELIK, opšti naziv za vrlo velik broj složenih (višekomponentnih) legura željeza s ugljikom i nizom drugih elemenata. Svi čelici sadrže ugljika manje od 2,0%, samo čelici bogati hromom iznimno ga sadrže nešto više. Pored ugljika u čeliku se redovno nalaze u većim ili manjim količinama metali kao što su mangan i bakar, ili drugi elementi kao što su silicijum, fosfor, sumpor, azot i kisik. Ovi elementi, koji se nazivaju pratiocima željeza, pridružuju se željezu u toku procesa dobijanja čelika. Sadržaj nekih od ovih elemenata, kao npr. mangana, silicijuma i ugljika, namjerno se povišava na kraju procesa dobijanja čelika, dok je sadržaj fosfora, sumpora, kisika i azota u čeliku redovito štetan i stoga nepoželjan, a uslovljen je upotrijebljениm sirovinama i primjenjenim tehničkim procesom dobijanja čelika. (Rijetko se i izuzetno fosfor, sumpor i azot namjerno dodaju čeliku radi postizanja specijalnih osobina.) Pored napred navedenih elemenata, čelicima se namjerno dodaju još i elementi hrom, nikal, molibden, vanadijum, volfram, aluminijum, bor i još neki drugi.

Čelik posjeduje niz izuzetno dobrih mehaničkih osobina koje se promjenom sadržaja ugljika od najnižih iznosa do 2,0%, pa mijenjanjem vrste i količine namjerno dodatih legirajućih elemenata i primjenom različitih postupaka proizvodnje i prerade, mogu mijenjati u vrlo širokom opsegu.

Jedna od najvažnijih mehaničkih osobina čelika jest njegova velika čvrstoča koja je gotovo jednaka u svim pravcima. Zatezna čvrstoča čelika iznosi od 20 do 400 kp/mm^2 ; i srednje čelici su, dakle, čvršći nego ostali konstruktivni materijali. Pored velike čvrstoče čelik je i elastičan, pa njegov modul elastičnosti može iznositi i do $21\,000 \text{ kp/mm}^2$, što znači da je i vrlo otporan na izvanje. Tvrdoča čelika može varirati unutar širokih granica: HB = = $50\cdots 950 \text{ kp/mm}^2$; tvrdi čelik je pogodan za izradu reznih i drugih alata. Livenjem, kovanjem, valjanjem, vučenjem, presovanjem, previjanjem i sl. mogu se izradivati čelični predmeti najrazličitijih oblika, a pored toga dijelovi od čelika mogu se vrlo efikasno spajati zavarivanjem, lemljenjem, zakivanjem i s pomoću vijaka. Neke vrste čelika nisu otporne prema koroziji, ali i potpuno nezaštićena površina običnog čelika izloženog atmosferilijama ne korodira dublje od $0.01\cdots 0.02 \text{ mm}$ godišnje. Inače, korozija se

ČELIK

može spriječiti zaštitnim premazima, a legiranjem se dobivaju nerđajuće vrste čelika. Jedna od glavnih prednosti čelika jest njegova niska cijena. S izuzetkom specijalnih čelika, ta cijena je osjetljivo niža nego bilo kog drugog metala.

Zahvaljujući tim osobinama i ekonomičnom načinu proizvodnje, čelici danas služe za mnogobrojne i raznovrsne potrebe svih grana industrije, saobraćaja, građevinarstva, poljoprivrede, zanatstva i drugih djelatnosti. Godišnja proizvodnja čelika u svijetu od 459,0 miliona tona (1965) jasno ukazuje na široke mogućnosti primjene ovog materijala, bez kojeg se današnja tehnika ne bi mogla zamisliti.

Historija čelika počinje u prethistorijsko doba, kad i historija željeza. Ne zna se da li je prvo željezo proizvedeno slučajno kad je prethistorijski čovjek naložio vatru na ležištu čiste željezne rude koju je bilo lako reducirati, ili je koristeci se već stecenim iskustvom u topljenju bakarne rude primijenio isti postupak na željeznu rudu. Taj postupak je bio primitivan i prilično jednostavan: u plitkom ognjištu pokrila se željezna ruda drvenim ugljem i ovaj se zapalio, pa je ispod vatre nastala gnijecava i spužvasta željezna masa, tzv. *nado* (engl. *bloom*, njem. *Luppe*). Da li će dobiveno nado biti gvožđe ili čelik nije zavisilo od volje i znanja čovjeka, nego u prvom redu od kvaliteta rude, a zatim od slučajnih faktora u primitivnom procesu proizvodnje. Jedino su narodi Azije vrlo rano pronašli postupak kojim su u malim lancima proizvodili čelik.

Od prvih početaka pa sve do XIV st., kad su konstruirane prve visoke peći, dobivao se čelik iz spužvastog nado proizvedenog u plitkom ognjištu ili u jednostavnoj oknasti peći. Upotrebljavala se čista ruda, a ako je ruda sadržavala nečistoće, ispirala se je prije topljenja, a ponekad i mrvića i pržila. Kao gorivo služio je drveni ugaj koji je istovremeno bio i reducent. Redukcija se je odvijala na relativno niskoj temperaturi uz malu apsorpciju topline, jer su neke reakcije ovog procesa u stvari egzotermne.

Plitka ognjišta su bila vrlo jednostavne konstrukcije. Sastojala su se od gnijezda oslojenog na jedan zid kroz koji je prolazila sapnica mijeha ili duvajka za raspirivanje vatre. Gnijezdo se je ispunilo naizmjeničnim slojevima rude i drvenog ugla i ugaj se zatim zapalio. Duvanjem zraka povisila se je temperatura u ognjištu toliko da se je iz rude reduciralo željezo. Pri tome je dobar dio željeza i dalje ostao vezan s kisikom i zajedno s nečistoćama kao tekuća troška otjecao iz ognjišta, a reducirani dio se je kao tjestovito nado skupljao u dnu ognjišta. Željezna ruda i drveni ugaj dodavali su se dok nadaju ispunilo gotovo čitavo ognjište, zatim se je nado izvadilo pa su se kovanjem istiskali iz njega ostaci troške i nečistoća.

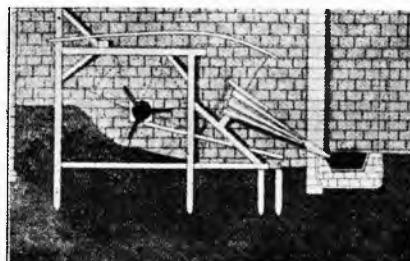
Plitka ognjišta u srednjoj Evropi i Njemačkoj (Rennfeuer, sl. 1) bila su sa-gradena od cigle, nešto iznad nivoa terena, s otvorom za oticanje troške u jednom bočnom zidu. Omjer između težina rude i drvenog ugla bio je $\sim 1 : 4$, iskorističavalo se $\sim 12,5\%$ željeza sadržanog u rudi, a težina nado iznosila je do 70 kg. Ovakva ognjišta su se održala u Štajerskoj i Šleziji sve do XVIII st.



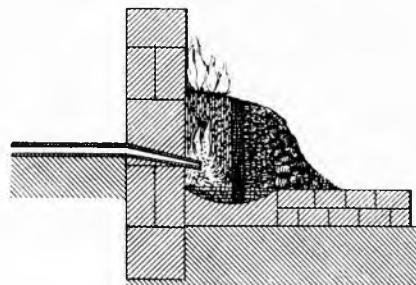
Sl. 1. Proizvodnja čelika na plitkom ognjištu u XV st.

U Španiji je postojao poseban tip plitkog ognjišta, tzv. katalansko ognjište (sl. 2). Bilo je upušteno u terenu i sagradeno u bakarnoj posudi eliptičkog oblika, koja je sprečavala da vlaga iz tla prodre u gnijezdo ognjišta. Na jednoj polovici ognjišta, uz sapnicu mijeha za duvanje zraka, stavljao se je drveni ugaj, a na drugoj polovici ognjišta smrvljena željezna ruda. Težinski odnos rude i ugla bio je $1 : 3,4$, iskorističavalo se $\sim 31\%$ željeza sadržanog u rudi, a jedna šarža je davalu do 150 kg čelika. Katalansko ognjište su se upotrebljavala i u Francuskoj, a na Pirenejima su se održala do XIX st.

Korzikansko ognjište se je sastojalo od okomitog zida s otvorom za sapnicu duvaljke i plitkog gnijezda od cigle (sl. 3). Služilo je i za pripremu rude prije topljenja; na nižoj temperaturi ruda se je najprije ispržila i tako već djelomično reducirala, a zatim se topila s pomoću ugla od kestenovog drveta. U korzikanskoj ognjištu se je uklonjeno nešto manje željeza nego u katalanskim ognjištima.



Sl. 2. Katalansko ognjište iz XVIII st.



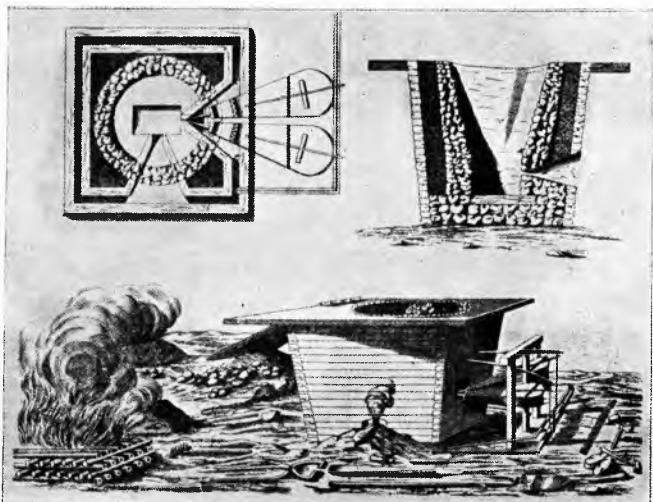
Sl. 3. Korzikansko ognjište iz XVIII st.

skom ognjištu trošilo se mnogo drvenog uglja, omjer utroška rude: uglja iznosio je $\sim 1 : 8,8$, ali je iskoristenje bilo relativno dobro jer se je u obliku čelika dobivalo $\sim 38\%$ željeza sadržanog u rudi. Ovaj tip ognjišta se je upotrebljavao na Korzici sve do XIX st.

Drugi tip vrlo stare topioničke peći jest oknasta peć (Stückofen, Schachtofen, sl. 4). Ova peć potječe iz nordijskih zemalja, gdje je nastala vjerojatno negdje početkom srednjeg vijeka. Održala se u skandinavskim zemljama do XIX st., a u Finskoj i do najnovijeg vremena. Oknasta peć u stvari predstavlja preteču današnje visoke peći.

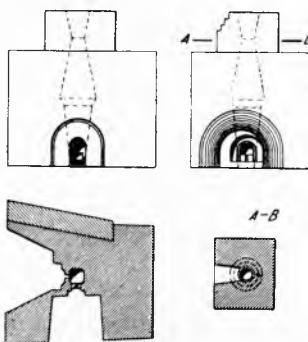
Nordijska oknasta peć bila je četverouglastog oblika, imala je kamene zidove obložene s vanjske strane drvenom oplatom. U jednom zidu bio je otvor za sapnicu mijeha, a u drugom ispuš za trošku. Proces topljenja bio je utoliko karakterističan što se u peći najprije palilo drvo i proizveo drveni ugaj, pa se na užareni ugaj dodavala ruda. Na taj se je način peć dobro zagrijala već prije nego se u nju stavila ruda. Jedna šarža je davalu nado težine do 20 kg.

Srednjevjekovne oknaste peći u istočnoj Njemačkoj (Šmalkaldenske peći) bile su već visoke $\sim 3,5$ m, zidane od cigle, a unutrašnja šupljina imala je oblik dvostrukog čunja (sl. 5). Najsjavršenije i najveće oknaste peći nalazile su se u Štajerskoj. Bile su visoke do 6 m, a jedna šarža je davalu do 900 kg željeza. Priprema rude je trajala vrlo dugi, jer se ruda najprije mrvića i pržila, a zatim nekoliko godina ostavljala na zraku da se dobro oksidira. U ovim pećima,



Sl. 4. Nordijska oknasta peć iz XVIII st.

uslijed visoke temperature, dio željeza se je topio i otjecao s troskom. Težinski odnos rude i utrošenog uglja bio je $\sim 1 : 2,5$, a iz rude se iskoristilo $\sim 39\%$ željeza. U ovaj tip oknaste peći spadaju i stare bosanske duvanice, visoke 2...4 m.



Sl. 5. Šmalkaldenska peć iz XVIII st.

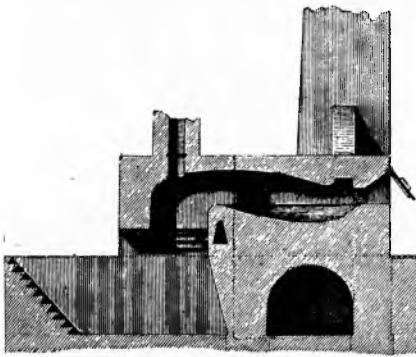
Primitivna plemena Afrike (Kamerun, Togo) još i danas upotrebljavaju oknaste peći koje imaju oblik boce čiji grlići služe kao kamini. Gradene su od ilovače, visoke su ~ 1 m, a promjaja je prirodna ili umjetna. Za umjetnu promjaju služe primitivne duvaljke.

U plitkim ognjištima i oknastim pećima čelik se je mogao dobiti samo iz čiste rude bogate manganim, uz više temperature topljenja i pažljivu regulaciju promjaje. Vrlo dugo vremena čelik je bio proizvod slučajnih okolnosti, jer ljudi nisu znali tehnološki postupak, iako su razlikovali čelik od gvožđa, i vrlo rano naučili cementirati i kaliti čelik. Izuzetak su bili Indijci i Japanci, koji su već u davnini poznavali procese proizvodnje čelika direktno iz rude ili indirektno iz gvožđa.

U indijskim grobovima iz \sim VI st. pronađeno je oružje od čelika, grčki pisac Ktesijas (\sim V do \sim IV st.) u svom opisu Indije spominje čelične mačeve; Aleksandar Veliki je u Indiji kao dragocjen poklon dobio grudu čelika tešku 15 kg, itd. Taj čelik, koji domoroci nazivaju *vuc*, proizvodio se u malim loncima, i to u Hajderabadu iz smjese rude i ugljenog praha, a u Misori iz mekog čelika uz dodatak nekih biljki koje su tokom procesa davale uglik potreban da nastane kaljivi čelik. Napunjeni i dobro zatvoreni lonci grijali su se u velikim pećima s umjetnom promjajom. Indijski čelik je bio visoko cijenjen pa su ga već u starom vijeku arapski trgovci počeli uvoziti i u Damasku preradivati u oružje. Zahvaljujući indijskom čeliku u Damasku se je bila razvila industrija oružja koja je kroz čitav srednji vijek zadražala primat u proizvodnji najkvalitetnijih maceva i sablji (demeskinje, dimiskije). Iz indijskog čelika Arapi su naizmjencičnim slaganjem, zagrijavanjem, kovanjem i prekivanjem snopova mekog i tvrdog kovovarenog čelika dobivali tzv. Damask-čelik plavkastog sjaja i karakterističnih šara, koje su bile posljedica nesavrsene difuzije uglikija između komponenti sklopa, tako da je čelični predmet zadražao slojevitost.

Na sličan način, prekivanjem snopova čelika, izradivali su se samurajski mačevi u starom Japanu. Japanci su proizvodili čelik iz gvožđa koje su najprije ostavljali godinama zakopano u zemlji da dobro prorda.

U XII st. pojavile su se u zapadnoj Njemačkoj prve visoke peći koje su proizvodile velike količine sirovog gvožđa. Zbog visokog postotka uglikija i drugih reduciranih i sa željezom legiranih elemenata, gvozdeni liv je bio svušte krt i pretvrđen za obradu, pa je trebalo pronaći rafinacijske postupke da se eliminiračanjem uglikija, mangana, silicijuma, itd. iz nečistog gvožđa proizvede čelik.



Sl. 6. Prva izvedba peći za pudlovanje (oko 1800)

Jedan od najstarijih rafinacijskih postupaka upotrebljavao se već u srednjem vijeku u Bresci. U kupku od rastopljene gvozdenog liva stavljali su se komadi mekog čelika koji su iz kupke preuzimali uglik i pretvarali se u kaljivi čelik, a uslijed gubitka uglikija i kupke je postajala čelična. Slični rafinacijski postupci upotrebljavali su se u Njemačkoj i Austriji. Veliki napredak u rafinaciji gvožđa postigao je Englez Henry Cort pronalaskom pudlovnog procesa 1783. Gvožđe se je rastopilo u peći za pudlovanje (jednoj vrsti peći plamenice, sl. 6) i neprekidno miješalo (engl. *to puddle* – miješati). Peć se je ložila kamenim ugљem, a nastali plinovi i troška oksidacijom su iz rastopa reducirali uglik, silicijum i mangan. Kako se je postotak uglikija u sirovom gvožđu smanjivao tako se je povisivala temperatura topljenja. Budući da se u peći za pudlovanje nije mogla razviti dovoljno visoka temperatura da bi čelik ostao tečan, rastop je postepeno prelazio u tjestastu masu. Grude željezne tijesta se su posebnim kukama okretele u plamenu i troški sve dok uglik nije bio dovoljno oksidiran i gvozdena gruda prešla u čelično nado. Troška zaostala u nadu istiskivala se je kovanjem.

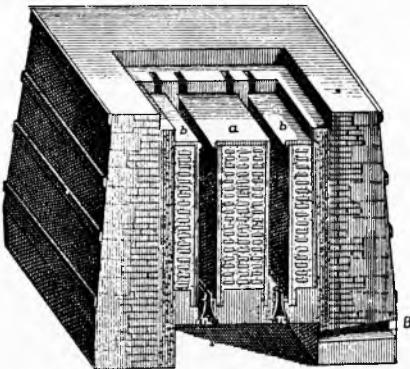
U XVII st. pronađen je, vjerojatno u Njemačkoj, postupak proizvodnje cementiranog kaljivog čelika. Šipke od mekanog čelika i drveni ugali žarili su se duže vremena u loncima, pa je na površini šipke nastao sloj cementiranog čelika.

Grijanjem i prekivanjem snopova cementiranih šipki dobivao se je cementirani čelik. Francuz René-Antoine Ferchault de Réaumur konstruirao je 1722 specijalnu peć za cementiranje šipki (sl. 7); umjesto u lonci, šipke su se ulagale u kanale ugradene u samoj peći. Iako je Réaumurova peć tehnički potpuno uspjela, ipak proizvodnja nije bila naročita, jer je u to vrijeme francuski mčki čelik bio suviše nečist za cementiranje. Réaumurove peći, ložene kamenim uglijem, su uspijehom su upotrebljavane u Engleskoj.

Engleski cementirani čelik bio je lošijeg kvaliteta od njemačkog jer Englezni nisu znali prekivati cementirane šipke. To je navelo engleskog urara Benjamina Huntsmana na ideju da poboljša strukturu i čistoću engleskog cementiranog čelika time da ga pretopi. Poteškoča je bila da se niti jednim od tada postojećih postupaka nije mogla postići temperatura dovoljno visoka da se čelik potpuno rastopi. Huntsman je 1740 počeo svoje pokuse i 1742 uspio rastopiti čelik u malim loncima od visokokvalitetnog vatrostalnog materijala u peći loženog koksa. Huntsmanov postupak proizvodnje čeličnog liva bio je u početku tajna. Kasnije je konkurenčija uspjela tu tajnu otkriti pa se već u drugoj polovici XVIII st. čelični liv proizvodio svuda u Engleskoj.

Moderne metode proizvodnje čelika počinju pronalaskom Engleza Henry Bessemera (1855) za proizvodnju čelika iz gvožđa u velikim okretnim kruškočkim posudama (zvanim konverterima), iznutri obloženim vatrostalnim materijalom bogatim kremenom kiselom. Zbog snažne promjaje, koja u procesu ima bitnu ulogu, ovaj postupak se naziva pneumatski. Nezavisno od Bessemera, isti postupak je bio pronašao i Amerikanac Kelly, ali je svoj patent prijavio godinu dana nakon Bessemera, pa je primat pripao Bessemeru.

U Bessemarovom »kiselom« konverteru nije se moglo preradivati sirovo gvožđe koje je sadržavalo visoki postotak fosfora i sumpora, pa je to ograničavalo primjenu ovog postupka. 1878 patentirao je Englez Sidney Gilchrist Thomas postupak koji se je u Bessemarovog razlikovao time što je konverter imao bazičnu oblogu od prženog dolomita, pa se je moglo u njemu kao sirovina koristiti gvožđe bogato fosforom. Radi vezanja fosfora u konverter se dodaje i živi kreč, a troška bogata fosforom služi kao izvrsno umjetno gnojivo (Thomasovo brašno).



Sl. 7. Réaumurova peć za cementiranje šipki

Sredinom XIX st. pronašao je Wilhelm Siemens tzv. regeneraciju topline, tj. način da se u pećima plamenicama koje upotrebljavaju generatorski plin kao gorivo (najprije se radilo o staklarskim pećima) temperatura znatno povisi time što se plin i zrak predgriju toplinom izlaznih dimnih plinova. Primjenom regeneracije topline moglo se i u plamenici potpuno odigrljiti rastopljenje gvožđe i time pretvoriti ga u čelik, a da ovaj do kraja ostane u tečnom stanju. Prvu takvu peć, sa 4 regenerativne komore, konstruirao je francuski fabrikant Pierre Martin 1864 i ona je kasnije nazvana Siemens-Martinova peć (SM-peć). Martin je ujedno uveo postupak pri kojem se u peći rastaljenom gvožđu dodaje željezna ruda i staro željezo (raskrov). Unutrašnja obloga Siemens-Martinove peći može biti kisel ili bazična, zavisno od sastava gvožđa za čiju je preradu peć namijenjena. Zbog brojnih prednosti Siemens-Martinov postupak danas ima dominantnu ulogu u svjetskoj proizvodnji čelika.

Za proizvodnju specijalnih legiranih čelika uveo je oko 1840 Friedrich Krupp postupak topljenje mekog čelika u zatvorenim grafitim loncima od 50...100 kg kapaciteta, uz dodatak legirajućih elemenata: ponajviše nikla, hroma, kobalta, volframa, molibdena i vanadijuma. Pronalaskom elektrolučne peći postupak proizvodnje specijalnih čelika u loncima izgubio je na značaju.

Elektrolučnu peć je prvi patentirao 1853 Francuz Pichon, a prvu uspješnu konstrukciju izradio je Wilhelm Siemens 1879. Na razvoju i usavršavanju elektročičkih topioničkih peći radili su u drugoj polovici XIX i početkom XX st. brojni naučnici i stručnjaci (P. Héroult, A. Kjellin, E. Stassano, W. Rodenhauer, Grönwall i dr.), pa zahvaljujući tome, kao i povećanju proizvodnje električne energije, elektrolučne i elektroindukcijske peći doble su važnu ulogu u proizvodnji specijalnih čelika.

U novije vrijeme razvijeno je više modernih postupaka proizvodnje čelika (LD-pneumatski proces, rotorski procesi, kombinirani procesi) koji su detaljno opisani u posebnom poglavju ovog članka.

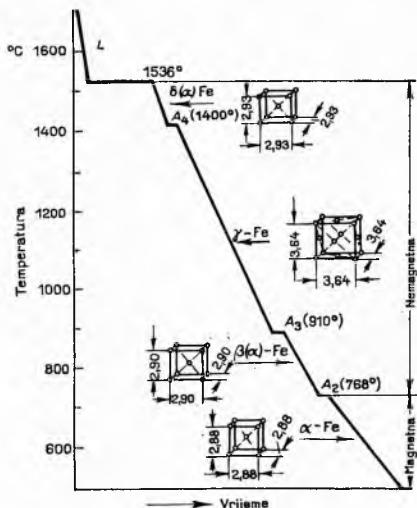
Postoji više načina klasifikacije i sistematizacije mnogobrojnih vrsta čelika. Najčešće se čelici klasificiraju *prema namjeni*, i to na konstrukcijske čelike, alatne čelike i čelike za specijalne namjene. Prema hemijskom sastavu čelici se dijele na ugljične i legirane; prema kvalitetu na obične (masovne), kvalitetne i plemenite; prema načinu proizvodnje na Siemens-Martinov (SM-) čelik, elektro-čelik, Bessemervi čelik, Thomasov čelik, LD-čelik itd.; prema načinu prerade na sirovi čelik, liveni čelik, kovani čelik, valjani čelik, vučeni čelik i presovani čelik; prema strukturi na feritni, perlitni, ledeburitni, martenzitni i austenitni čelik. Sve ove klasifikacije daju pregled različitih vrsta čelika koje se danas izrađuju, ali ne predstavljaju standardizovane vrste čelika niti u svemu služe kao osnova za standardizaciju.

FIZIČKE I MEHANIČKE OSOBINE ČELIKA

Osobine čelika uslovljene su određenim osobinama čistog željeza, prirodnom i količinom pratećih elemenata prisutnih u čeliku i odnosom među željezom, pratećim elementima i najorijetno dodatim legirajućim komponentama. Osim toga značajan uticaj na osobine čelika može imati postupak izrade čelika, i, još više, način prerade čelika do finalnog proizvoda.

Cisto željezo. Sve osobine čistog željeza, kako variraju u zavisnosti od stepena njegove čistoće. Većina osobina određena je na čistom željezu dobijenom pretapanjem ili žarenjem elektrolitskog željeza u visokom vakuumu (sadržaj Fe 99,90…99,98%).

Temperatura topanja i očvršćavanja željeza je 1536°C, temperatura ključanja iznad 3200°C. Željezo je polimorfno: u čvrstom stanju u zavisnosti od temperature postoji u dvije alotropske modifikacije: α (δ) i γ . Temperature preobražaja, karakter i parametri kristalnih rešetki koje se dobijaju pri hlađenju čistog željeza pokazani su u slici 8. Temperature preobražaja zavise od brzine hlađenja, odnosno zagrijevanja, tj. vezane su za određenu histerezu.



Sl. 8. Kriva hlađenja čistog željeza i kristalne rešetke njegovih alotropnih modifikacija

Modifikacija δ , koja ima prostorno centriranu kubnu kristalnu rešetku, može da rastvori do 0,1% C i nemagnetična je. Modifikacija γ nemagnetična je i rastvara do 2,06% C. Ima površinski centriranu kubnu kristalnu rešetku. Modifikacija α je u temperaturskoj oblasti 910…768 °C nemagnetična, a ispod ove temperature postaje magnetična. (Magnetično α -željezo naziva se ponekad β -željezom.) α -Željezo rastvara na 723 °C do 0,02% C, a na sobnoj temperaturi samo 0,006%. Modifikacije α , β i δ imaju jednake kristalne rešetke (prostorno centrirane kubne rešetke), a neznatne razlike u parametrima ovih rešetaka objašnjavaju se termičkim širenjem s obzirom na temperature postojanja ovih modifikacija. Polimorfija čistog željeza omogućava promjenu osobina čelika u širokom spektru i zbog toga je neobično važna.

Ostali važni fizički parametri čistog željeza jesu: specifična masa na 20 °C 7,876 g/cm³; srednja specifična toplota za interval 0…1500 °C 0,1627 cal/g °C; srednji linearni koeficijent širenja α između 0 °C i niže datih temperatura iznosi:

Temperatura, °C	100	200	300	400	500	600	700	800
α (10 ⁻⁶ /°C)	11,9	12,3	13,1	13,7	14,4	14,7	14,9	14,5

Provodljivost toplote λ zavisi, osim od čistoće, takođe od stepena deformacije kristalne rešetke i od veličine kristalnih zrna; u temperaturskoj oblasti od -182 do 800 °C varira od 0,224 do 0,071 cal/cm² °C; električni specifični otpor na 20 °C iznosi 0,100 Ω mm²/m.

Mehaničke osobine čistog željeza takođe izrazito zavise od čistoće, ali i od veličine kristalnih zrna i temperature ispitivanja. Vrlo mali sadržaj ugljika djeluje bitno. Tako granica razvlačenja pri sadržaju 0,0005% ugljika iznosi 10 kp/mm², a pri sadržaju 0,005% 20 kp/mm². Čisto željezo ne pokazuje izrazitu granicu razvlačenja (poput aluminijuma, v. TE 1, str. 244). Hookeov

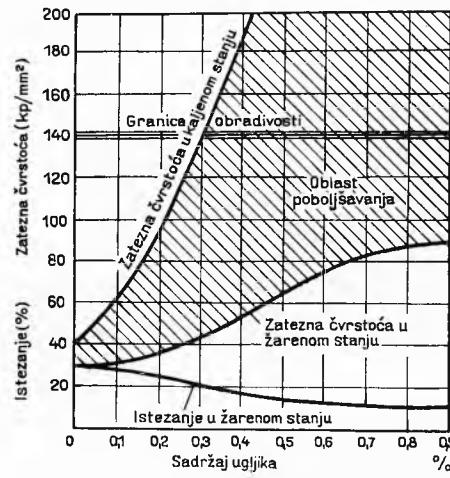
zakon važi samo približno kod malih opterećenja. Neke važnije mehaničke osobine elektrolitskog željeza nalaze se u ovim granicama: tvrdoča HB 45…55 kp/mm²; granica razvlačenja 10…14 kp/mm², zatezna čvrstoča 18…25 kp/mm², istezanje ($l_0 = 4 \sqrt{A_0}$): 50…40%; kontrakcija: 80…70%; žilavost (Charpy, V-proba): ~ 26 kpm; modul elastičnosti: 20 000…21 000 kp/mm²; Poissonov broj $\mu = 0,28$. Usitnjavanjem zrna povlašava se granica razvlačenja i zatezna čvrstoča. Ove veličine takođe rastu pri snižavanju temperature, odnosno opadaju pri porastu temperature iznad sobne. Duktilna svojstva koja normalno pokazuju suprotnu zavisnost mogu da se, zbog prisustva stranih atoma, ne podvrgavaju ovoj zakonitosti u izvjesnim slučajevima. Žilavost čistog željeza leži na niskim temperaturama pa sve do obične temperature u oblasti krtih lomova.

Cisto željezo se dobro obraduje kovanjem, izvlačenjem (pri ovim operacijama se granica razvlačenja i čvrstoča povećavaju, a duktilna svojstva smanjuju), zavarivanjem. Obrada struganjem je teška zbog velike plastičnosti.

Više o osobinama čistog željeza v. Željezo.

Uticaj legirajućih elemenata na osobine čelika. Legirajući elementi (pod ovim pojmom obuhvaćeni su ovdje i prateći elementi) mijenjaju osobine čelika u širokom opsegu. Ove promjene osobina vezane su za promjenu strukture koja se dešava pod uticajem legirajućih komponenata. Prisutni element se može sam ili u obliku jedinjenja sa drugim prisutnim elementom rastvarati u kristalnoj rešetki željeza obrazujući mješovite kristale, ili pak sam ili opet kao jedinjenje može ostati nerastvoren među kristalima željeza. Pri tome svi ovi legirajući elementi jače ili slabije utiču na temperaturu topanja, tako i na temperature prelaza željeza iz jedne alotropne modifikacije u drugu. Djejstva određenog broja legirajućih elemenata uslovljena su time što se oni vezuju za ugljik u obliku hemijskih jedinjenja, karbida. Svaka od ovih struktura daje određena svojstva čeliku. Legirajući elementi utiču na mehaničke, tehničke, fizičke, hemijske i dr. osobine i mijenjaju ih u širem ili užem intervalu. Uticaj najvažnijih legirajućih elemenata na neke za tehniku značajne osobine čelika naveden je u nastavku.

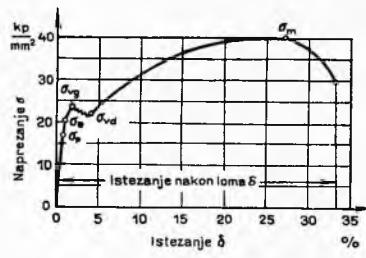
Ugljik od svih legirajućih elemenata ima najjače djelovanje na osobine čelika. Najvažnije je svojstvo ugljika da povlašava čvrstoču i čini čelik zakaljivim. Do 0,9% sadržaja ugljika svakih 0,1% ugljika povlašava čvrstoču za 7…8 kp/mm², tvrdoču HB za 25 kp/mm². Zavisnost čvrstoče i istezanja u normalizovanom stanju i čvrstoče u kaljenom stanju od sadržaja ugljika pokazuje



Sl. 9. Zavisnost mehaničkih osobina čelika od sadržaja ugljika (prema Wendtu)

slika 9. Odrezak ordinata između linija pomenuih čvrstoča (u sraširanom polju) pokazuje interval u kom je moguće mijenjanjem uslova pri napuštanju mijenjati čvrstoču čelika sa datim sadržajem ugljika (vidi poglavlje Termička obrada u ovom članku).

Ponašanje čelika sa 0,15% C (mekog) pod djelovanjem statičke sile istezanja prikazuje dijagram σ , δ na slici 10. Pri manjim opterećenjima, do granice proporcionalnosti σ_p , vlada Hookeov zakon;



Sl. 10. Dijagram naprezanje-istezanje mekog čelika

postoji izražena gornja i donja granica razvlačenja, σ_{vg} , σ_{vd} , a pri daljem naprezanju čelik se uz stalno očvršćavanje u zнатноj mjeri plastično deformiše do loma. Kvalitetno jednake dijagramne σ , δ imaju i čelici sa višim sadržajem ugljika; razlike su u zнатno većim vrijednostima za čvrstoču i nižim za istezanje. Čelici u kaljenom i poboljšanom stanju nemaju izraženu granicu razvlačenja, te se umjesto ove određuje takozvana granica $\sigma_{0,2}$ (v. TE 1, str. 244). Izgled dijagrama za kaljeno i poboljšano stanje jednog čelika pokazuje sl. 11.

Žilavost i obradljivost hladnom deformacijom opada sa porastom ugljika. Obradljivost kovanjem i valjanjem praktično je nezavisna od sadržanja ugljika u temperaturskoj oblasti od 950 do 1200 °C, dok pri temperaturama ispod 950 °C ta obradljivost osjetno opada sa porastom ugljika. Otpornost prema habanju raste sa porastom sadržaja ugljika. Najbolju mehaničku obradljivost imaju čelici sa srednjim sadržajem ugljika; ova se pogoršava i povišenjem i sniženjem sadržaja ugljika iznad, odn. ispod određene granice.

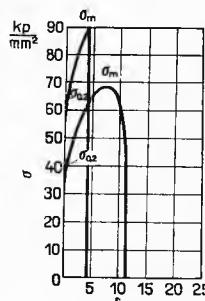
Svaki procenat silicijuma povišava zateznu čvrstoču za ~ 10 kp/mm², a granicu razvlačenja za ~ 7 kp/mm². Istezanje i kontrakcija opadaju malo sa porastom silicijuma do 2%. Granica elastičnosti se dodatkom silicijuma bitno povišava, te se čelici legirani ovim elementom upotrebljavaju za izradu opruga. Obradljivost hladnom deformacijom i žilavost jako opadaju kad sadržaj silicijuma poraste iznad 0,10%. Dodatak silicijuma povoljno utiče na otpornost prema habanju i na tvrdoču, naročito u prisustvu povišenog sadržaja ugljika. Obradljivost mehaničkim putem i obradljivost valjanjem i kovanjem smanjuju se pri povišenom sadržaju silicijuma, naročito ako su temperature kovanja i valjanja niske i ako sadržaj ovog elementa prelazi 2%. Silicijum povoljno utiče na postojanost prema koroziji i oksidaciji na povišenim temperaturama, naročito izrazito u prisustvu hroma i aluminijuma.

Djelovanje mangana na mehaničke osobine čelika može se ocijeniti kao povoljnije nego djelovanje silicijuma, jer do sadržaja od 7% Mn on podiže u istom odnosu čvrstoču i granicu razvlačenja kao silicijum, a istovremeno se istezanje, kontrakcija i obradljivost plastičnom deformacijom neznatno smanjuju. Ova prednost postoji i u odnosu na ugljik, jer za isti porast čvrstoće ostvaren manganom pomenute duktilne karakteristike čelika ostaju znatno više od onih koje se dobijaju pri legiranju samo sa ugljikom. Ovo se iskoristiava pri izradi limova viših čvrstoća od kojih se istovremeno traži i dobra obradljivost dubokim izvlačenjem.

Zbog osobine mangana da povišava prokaljivost, čelici legirani ovim elementom pogodni su za poboljšavanje, a nisu dobri kao alatni čelici koji moraju imati vrlo tvrdu površinu, a žilavo jezgro.

Sasvim novi kvalitet čelika dobije se ako je uz visok procenat mangana prisutan i visok procenat ugljika. Ovakav odnos ova dva elementa uslovjava dobijanje austenitne strukture koja se odlikuje malom čvrstoćom i tvrdoćom, a veoma velikim istezanjem i žilavoču. Osim toga takvi čelici imaju sposobnost da pod djeljstvom spoljnih sile, naročito pritisaka, postanu veoma čvrsti, što ih čini veoma pogodnim za upotrebu na mjestima koja su izložena velikom habanju, a veoma nepogodnim za obradu reznim alatom.

Na obradljivost u toploem stanju mangan utiče utoliko povoljno što vezuje kisik i sumpor. Jedinjenja ovih elemenata sa manganom su teže topljiva od odgovarajućih jedinjenja sa



Sl. 11. Dijagram naprezanje-istezanje jednog čelika u kaljenom (lijevo) i poboljšanom (desno) stanju (detaljno)

željezom, te se time smanjuje opasnost od loma u crvenom usijanju pri oblikovanju pritiskom.

Čelici sa sadržajem mangana preko 10%, naročito u prisustvu hroma, pokazuju veliku otpornost prema koroziji, a smanjenu otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama.

Fosfor u količinama u kojima se obično nalazi u čeliku neznatno povišava čvrstoču, a bitno može da snizi duktilna svojstva: istezanje, obradljivost hladnom deformacijom i naročito žilavost. Pri sadržaju fosfora od 0,2% i na niskim temperaturama žilavost čelika pada praktično na nulu. Zahvaljujući tome da povećava krtost, fosfor pogoduje mehaničkoj obradljivosti mekog čelika (čelik se pri struganju ne razmazuje i daje kratku strugotinu).

Mada čelici sa većim sadržajem fosfora pokazuju veću sposobnost tečenja i zbog toga bolje ispunjavaju kalupe i kalibre, ovi čelici pri toploj preradi kovanjem i valjanjem naginju pucanju, te stoga veći sadržaj fosfora nije poželjan. Postojanost čelika prema koroziji poboljšava se prisustvom fosfora, naročito ako u čeliku ima i bakra.

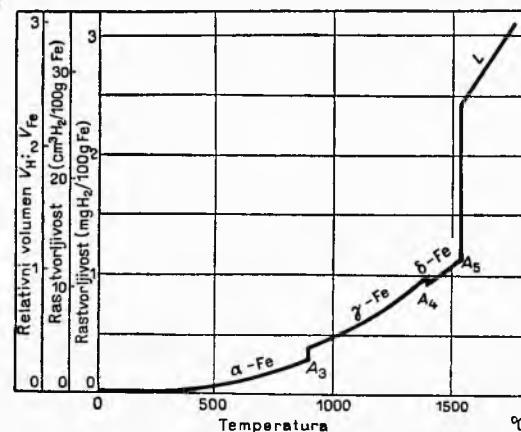
Sumpor se u čeliku nalazi u obliku nerastvorenih sulfida željeza i mangana, tzv. nemetalnih uključaka. Ovi uključci su plastični, te se pri toploj preradi izdužuju razaračući u većoj mjeri vezu metalnih strukturalnih komponenata. Pri sadržaju većem od 0,040% sumpor negativno djeluje na čvrstoču, granicu razvlačenja, kontrakciju, istezanje, žilavost, obradljivost u toploem stanju (uzrokuje lom u crvenom usijanju) i u hladnom stanju, otpornost prema habanju i otpornost prema površinskoj oksidaciji. Sumpor na sličan način kao i fosfor pogoduje obradi struganjem jer krti čelik daje kraću strugotinu. To se koristi pri proizvodnji čelika za izradu manje odgovornih detalja na automatima (tzv. automatskih čelika); u takvim je čelicima sadržaj sumpora i do 0,300; pored 0,100% P.

Kisik i vodik jedini su elementi pratioci željeza kojima se sadržaj ni u kom slučaju namjerno ne povišava u toku tehničkog procesa dobijanja čelika, već se uvijek teži da njihova količina u čeliku, zbog apsolutno štetnog djelovanja, bude što manja.

Praktično čitav sadržaj *kisika*, koji u zavisnosti od primijenjene tehnologije iznosi 0,005...0,06%, nalazi se u čeliku u obliku oksida željeza, mangana, silicijuma i aluminijuma (ova dva posljednja ukoliko su prisutna), tj. u obliku nemetalnih uključaka. Ovi uključci djelujući kao zarezi negativno utiču na dinamičku čvrstoču, na žilavost i na obradljivost hladnom deformacijom. Velika količina ovih uključaka daje tzv. drvenasti lom i uslovjava velike razlike između osobina čelika u pravcu tople prerade i normalno na taj pravac.

Izrazito negativno djelovanje kisika odražava se na sposobnost prerade u toploem jer, kao i sumpor, izaziva lom u crvenom usijanju. Ova pojava se pospješuje ako je sadržaj sumpora visok, jer se na 900...950 °C obrazuje lako topljivi eutektikum FeO-FeS na granicama kristalnih zrna. Uslijed toga pod pritiskom u crvenom usijanju dolazi do raskidanja veze među metalnim kristalima, što izaziva lom.

Vodik djeluje štetno time što pogoršava duktilna svojstva čelika i izaziva u unutrašnjosti čelika pukotine, tzv. pahuljice. Ove pukotine su rezultat naknadnog izlučivanja vodika iz



Sl. 12. Rastvorljivost vodika u željezu u zavisnosti od temperature

presičenog rastvora u α -željezu. Rastvorljivost vodika mijenja se sa temperaturom kako pokazuje slika 12. Kako se hlađenje čelika praktično uvijek odigrava u kraćem vremenu nego što je potrebno da se izluči višak vodika, to on ostaje u kristalnoj rešeci u količini koja ne odgovara ravnotežnom stanju. Smatra se da naknadno izlučivanje vodika iz kristalne rešetke i skupljanje na jednom mjestu u molekularnom obliku izaziva pritisak koji prevazilazi čvrstoču materijala i time dovodi do pojave gore spomenutih pukotina. Prečnik ovih pukotina može varirati od desetinke milimetara do 30 milimetara. One se, ukoliko nisu došle u dodir sa vazduhom, uz primjenu viših pritiska i temperaturna mogu zavariti. Njihova pojava može se izbjegći odgovarajućim laganim hlađenjem u temperaturskoj oblasti između 400 i 150 °C. Čelici legirani sa hromom i niklom su posebno osjetljivi na stvaranje pahuljica, a ugljični čelici sa sadržajem ugljika ispod 0,3% praktično nikad ne pokazuju tu pojavu.

Sadržaj azota, u zavisnosti od primijenjene tehnologije, varira od 0,003 do 0,025%. Sa porastom sadržaja azota rastu čvrstoča i tvrdoča, a duktilna svojstva opadaju. Najznačajnije djelovanje azota, a u isto vrijeme i najnegativnije, jest snižavanje otpornosti prema starenju, uslijed čega dolazi do znatnog pogoršanja mehaničkih i magnetskih osobina. Razlog je toj pojavi naknadno izlučivanje nitrida željeza (Fe_2N) iz presičenog rastvora azota u željezu. Ovaj proces izlučivanja izaziva u prostornoj rešeci željeza dodatna naprezanja koja vode do povišenja tvrdoće i snižavanja žilavosti. Promjene ovih osobina naročito se ispoljavaju na nižim temperaturama, tako da je čelik bogat azotom na 0 °C sasvim krt i praktično neupotrebljiv za mjesta gdje dolazi do udarnih naprezanja. Ovakvo štetno djelovanje azota sprečava se time što se dodaju čeliku elementi koji stvaraju nitride nerastvorljive u željezu (Al, Ti, V, Zr). Ovakvom kombinacijom štetno djelovanje azota pretvara se u korisno, jer su nerastvorenii nitridi ovih elemenata nosioci tvrdoće (koristi se pri nitriranju površine).

Bakar, zbog toga što je plemeniti od željeza, u tehnološkom procesu izrade čelika ne može se ukloniti ako je unesen sa sirovinama, te ga danas čelici skoro redovno sadrže u količini od 0,15 do 0,25%. U količinama iznad 0,5% bakar povišava čvrstoču i granicu razvlačenja, a na duktilne osobine utiče, i to negativno, već sadržaj iznad 0,3%. Veći sadržaj bakra naročito negativno djeluje na obradljivost u toploem stanju, jer izaziva pukotine (slično kao sumpor i kisik). Razlog je ove pojave selektivna oksidacija površine pri zagrijevanju prije tople obrade i sakupljanje metalnog bakra u većoj koncentraciji na kristalnim granicama. Rastapanjem tog bakra na 1083 °C raskida se veza među kristalima pa se stvaraju pukotine. Bakar se namjerno dodaje jednom broju čelika u količini 0,25...0,5% radi postizanja bolje otpornosti prema atmosferskoj koroziji.

Hrom se takođe ubraja u prateće elemente u čelicima; zahvaljujući tome što se unosi sa starim željezom, može ga biti i u nelegiranim čelicima do 0,30%. Kao legirajuća komponenta se namjerno dodaje čelicima radi postizanja određenih svojstava. Znatno povišava čvrstoču i granicu razvlačenja kako na običnim tako i na povišenim temperaturama (1% Cr povišava čvrstoču za 8...10 kp/mm²), dok istezanje i kontrakcija slabije opadaju sa porastom sadržaja hroma. Veoma često se hrom koristi za povišenje tvrdoće čelika i njegove otpornosti prema habanju. Obradljivost u hladnom stanju jako zavisi od sadržaja hroma, ali isto tako i od strukture koju čelik ima uz dati sadržaj hroma. Tako čelik sa 0,10% ugljika i 20% hroma ima feritnu strukturu i u tom slučaju hrom pogoršava obradljivost, ali ako se uz pomenuti sadržaj hroma i ugljika nade i 10% nikla, dobije se austenitna struktura, i obradljivost u hladnom stanju jako se poboljšava.

Otpornost prema oksidaciji na običnoj i povišenoj temperaturi i uopšte otpornost prema koroziji znatno se poboljšava dodatkom hroma. Ovakva djelovanja se zasnivaju na stvaranju čvrstog, kompaktnog sloja hrom-oksida na površini čelika. Čelici otporni prema koroziji u agresivnim sredinama (kiselinama i dr.) sadrže hrom u količinama iznad 12%, uz mangan i nikal. Čelici otporni u vatri i čelici otporni prema oksidaciji na povišenim temperaturama sadrže 3...12% hroma, pored određenog sadržaja aluminijuma i silicijuma. Hrom povoljno djeluje na magnetska svojstva, što se koristi pri izradi trajnih magneta. Čelici legirani sa hro-

mom teže se plastično deformišu, što se negativno manifestuje pri toploj preradi kovanjem i valjanjem. Pri takvoj obradi negativno se odražava i manja toplotna provodnost ovih čelika. Brzo zagrijevanje ili hlađenje može dovesti do pojave pukotina u hromnim čelicima.

Nikal povećava čvrstoču čelika (svaki procenat za 4 kp/mm²) uz neznatno sniženje istezanja i kontrakcije. Kada procenat nikla u čeliku pređe 20%, dobije se austenitna struktura i čvrstoča opada a duktilne osobine bitno rastu. Žilavost i obradljivost hladnom deformacijom znatno se poboljšava u prisustvu nikla. Konstrukcijski čelici sa sadržajem nikla do 5% obično sadrže još hrom i molibden i upotrebljavaju se u poboljšanom stanju. Zbog visoke cijene nikla nastoje se ovi čelici zamijeniti hrom-molibdenskim čelicima, ali kad čelik treba da bude vrlo žilav, ova zamjena se ne može izvršiti. Nezamjenljivi su čelici sa visokim procentom nikla za specijalne primjene: od čelika sa visokim električnim otporom (sadržaj nikla iznad 25% + dodatak hroma i aluminijuma za povišenje otpornosti prema oksidaciji na povišenim temperaturama) izrađuju se žice za grijne spirale; mali termički koeficijent rastezanja nekih čelika s visokim sadržajem nikla (npr. »invar«-čelik sa 36% Ni) koristi se za izradu preciznih instrumenata; nikalni austenitni čelici ohlađeni u vodi nisu uopšte magnetični.

Čelici sa samim *molibdenom* kao legirajućim elementom nemaju praktične primjene. Molibden se veoma često dodaje konstrukcijskim čelicima legiranim hromom, mangansom, ili hromom i niklom u količini 0,2...0,5%, a alatnim čelicima legiranim vanadijumom i volframom do 10%. U navedenim konstrukcijskim čelicima molibden sprečava tzv. krtost napuštanja, tj. srušavanje žilavosti pri napuštanju u temperaturskoj oblasti 475...600 °C. Alatnim čelicima dodatak molibdena povišava otpornost pri rezanju. Dodatkom molibdena u količini 1...5% hrom-nikalnim čelicima povišava se dalje otpornost ovih čelika prema koroziji. Naprotiv, dodatak molibdena negativno utiče na otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama.

Vanadijum, kao i molibden, dodaje se često legiranim konstrukcijskim i alatnim čelicima. Djelovanje mu je slično djelovanju molibdena. Osim toga već u količini iznad 0,05% povećava otpornost prema starenju, zatim povoljno utiče na nitriranje čelika (čelici za nitriranje sadrže ga 0,2...0,5%). Vanadijum vanredno povoljno djeluje na postojanost prema napuštanju, što znači da zakaljeni vanadijum-čelici do 600 °C praktično ne gube svoju čvrstoču. Zbog ovog svojeg djelovanja kao i zbog povoljnog djejstva na sposobnost rezanja vanadijum se dodaje u količini do 0,5% čelicima za rad u toploem — čelicima za matrice, nakovnje, trnove i dr. — i do 5% brzoreznim čelicima.

Volfram je glavni legirajući element u čelicima za rad u toploem i za brzorezne čelike. Djelovanje volframa je umnogome slično djelovanju hroma, tj. ono povećava čvrstoču na običnoj i povišenoj temperaturi, tvrdoču, otpornost prema habanju, uz istovremeno neznatno srušavanje istezanja. Osim toga volfram smanjuje krtost napuštanja i poboljšava postojanost prema napuštanju, što čini čelike legirane volfratom pogodnim za izradu alata. Izuzev neke čelike izradene samo na bazi ugljik-volfram, u primjeni su mahom čelici koji pored volframa sadrže i druge karbidotvorne elemente. Volfram ima negativno djelovanje na obradljivost čelika deformacijom u toploem stanju i na provodljivost toplote. Volfram se dodaje čelicima za trajne magnete u količini 4...7%.

Kobalt povišava čvrstoču, otpornost prema habanju, postojanost pri napuštanju i izdržljivost pri rezanju. Srazmjerno rijetko se upotrebljava, i to uglavnom za izradu nekih specijalnih brzoreznih čelika, čelika otpornih prema koroziji, čelika za rad u toploem i magnetnih čelika.

Aluminijum kao legirajući element uglavnom se upotrebljava za proizvodnju čelika za rad u vrućem i za čelike otporne prema oksidaciji na povišenim temperaturama. Sadržaj je aluminijuma u tim legurama 1...5%, uz istovremeno prisustvo hroma i silicijuma. Osim toga aluminijum se dodaje i čelicima za nitriranje do 1% i čelicima za trajne magnete do 15%. Aluminijum se u proizvodnji čelika upotrebljava za dezoksidaciju čelika (vezivanje kisika) i za regulisanje veličine zrna.

Ostali legirajući elementi: titan, tantal, niob, cirkonijum, cer, bor i dr. dosta se rijetko primjenjuju pa su od manjeg značaja.

U čeliku se, u zavisnosti od porijekla upotrijebljenih sirovina, kao prateći elementi mogu naći još *arsen*, *antimon* i *kalaj*, koji imaju uglavnom štetno djelstvo na kvalitet čelika.

Napred opisani uticaj pojedinih elemenata na osobine čelika, tj. uticaj hemijskog sastava na osobine čelika, samo približno ukazuje na to što se može očekivati od čelika određenog sastava. Struktura čelika za jedan isti sastav može, zavisno od uslova prerade i termičke obrade, biti veoma različita, a osim nje na osobine čelika utiču raspodjela nemetalnih uključaka, segregacije, tj. lokalna nakupljanja pojedinih elemenata, mjehuri, pahuljice i sl. pojave koje sve ili pojedinačno mogu biti prisutne u čeliku. O ovim pojavama, pa prema tome i o osobinama čelika koje se mogu postići, može se više znati ako se pored hemijskog sastava zna kako na njih utiče izrada odnosno prerada čelika, odnosno ako se zna u kome se stanju nalazi čelik. (V. naredno poglavlje.)

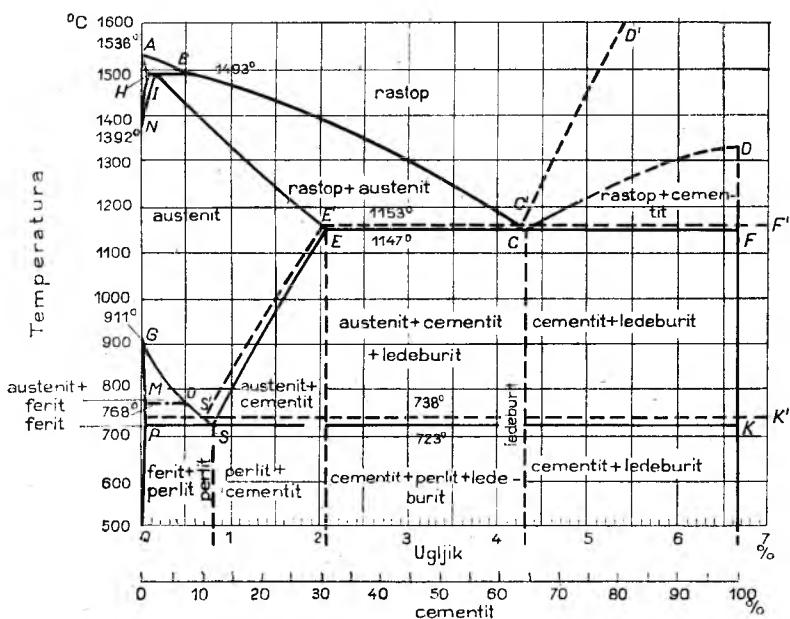
M. Tuvan

STRUKTURA ČELIKA

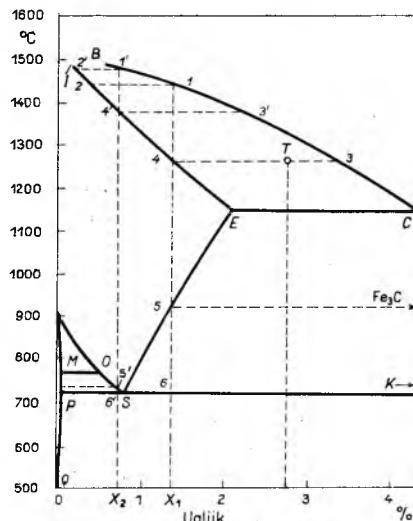
Ugljični čelik

Dijagram željezo-ugljik. Osnovne informacije o odnosima između elementa željeza i najvažnijeg legirajućeg elementa u tehničkom čeliku i gvoždu, ugljika, daje dijagram stanja Fe-C (slika 13). Taj dijagram predstavlja osnovu za tumačenje razlika među osobinama različitih legura željeza i ugljika, ili iste legure tih elemenata na različitim temperaturama, — drugim riječima, za tumačenje promjena koje nastaju u tim legurama kad se podvrgavaju obradi pri kojoj im se mijenja temperatura i/ili sastav.

Dijagram stanja Fe-C prikazuje odnose termodinamičke ravnoteže u dva binarna sistema: pune linije prikazuju granice između faza u metastabilnom sistemu Fe- Fe_3C , isprekidane linije prikazuju te granice u stabilnom sistemu Fe-C (ukoliko se razlikuju od granica u metastabilnom sistemu). Željezo, naime, gradi s ugljikom spoj (jedinjenje) Fe_3C koji je metastabilan, tj. termodinamički nije postojan, ali se i na povišenoj temperaturi raspada na željezo i ugljik (grafit) tako sporo da kao strukturalni sastojak čelika (kao takav zvan *cementit*) može da nepromijenjen opstoji praktično neograničeno dugo vrijeme i sa željezom graditi binarne legure Fe- Fe_3C . Budući da cementit sadrži 6,67% C, dijagram koji prikazuje strukturalna stanja tih binarnih legura (metastabilni sistem) prikazan je na slici 13 u cjelini, dok je od dijagrama stabilnog sistema, tj. sistema u kojem se ugljik ne pojavljuje u kemijskom spoju (Fe_3C) nego samo u rastvoru ili slobodan (kao grafit), prikazan na toj slici samo dio do 7% C, koji je tehnički jedini interesantan. Linija ABCD (odn. $ABC'D'$), zvana *likvidus*, prikazuje kako sadržaj ugljika utiče na tačku (početnog) topljenja legure, tj. ona pokazuje na kojim se temperaturama pri hlađenju rastopa određenog sastava počinju izlučivati



Sl. 13. Dijagram stanja željezo-ugljik



Sl. 14. Uz prikaz faznih promjena u čeliku pri promjeni temperature

kristali, odnosno, na kojoj će se temperaturi pri grijanju legure određenog sastava rastopiti i posljednji kristalić. Linija *AHIECF* (odn. *AHIE'C'F'*), zvana *solidus*, prikazuje na kojim temperaturama očvrsne i posljednja tečna kap pri hlađenju rastopa odn. počinje da se topi legura određenog sastava. Dijelovi tih linija *AH* i *IE* (odn. *IE'*) ujedno pokazuju koliko ugljika sadrže kristali koji su na određenoj temperaturi u ravnoteži s rastopom, a odgovarajuća tačka na likvidusu pokazuje koliki je na toj temperaturi ravnotežni sadržaj ugljika u rastopu. Analogno prikazuju ostale linije na dijagramu kako djeluje sadržaj ugljika na temperature prelaza jedne čvrste faze u drugu, tj. na kojim temperaturama uz određeni ukupni sadržaj ugljika počinje ili završava prelaz δ -kristala u γ -kristale ili obrnuto (linije *HN, NI*), γ -kristala u α -kristale ili obrnuto (linije *GMPS* odn. *GMP'S*, *GS* odn. *GS'*), γ -kristala u cementit, odn. željezo i grafit, i obrnuto (linije *SKF*, odn. *S'K'F'*, *SE*, odn. *S'E'*), α -kristala u cementit i obrnuto (*KL, PQ*) i koliki su sadržaji tih faza na određenoj temperaturi u stanju (meta-)stabilne ravnoteže.

Ravnotežno stanje legure određenog sastava na određenoj temperaturi prikazano je u dijagramu figurativnom tačkom s odgovarajućim koordinatama. Položaj te tačke u odnosu na linije u dijagramu pokazuje kakvo je to stanje. Tako, npr., ako se figurativna tačka nalazi iznad likvidusa $ABCD$ (odn. $ABC'D'$), legura je sva u tečnom stanju; ako se nalazi u kojem od područja ograničenih linijama ispod likvidusa, ona je čvrsta ako je tačka ispod solidusa, a smjesa čvrste i tečne faze ako je između likvidusa i solidusa. Analognog može i u čvrstom stanju legura biti homogena, tj. sastavljena od jedne faze (npr. ako je njena figurativna tačka iznad linije GSE), ili heterogena, tj. sastavljena od više faza (ako je ispod te linije i iznad linije GP). Sastav faza u heterogenoj ravnoteži prikazan je sjecištima horizontala kroz figurativnu tačku sa ravnotežnim linijama, a relativne količine jedne i druge faze u ravnoteži obrnuto su proporcionalne horizontalnim udaljenostima figurativne tačke od tih linija (*pravilo poluge*). Npr. tačka T (sl. 14) prikazuje ravnotežno stanje legure željeza sa 2,75% ugljika na temperaturi od 1263°C ; u tom stanju legura je djelimično rastopljena i sastoji se od smjese tečnosti sa 3,36% C (tačka 3) i kristala sa 1,37% C (tačka 4), i to u težinskom odnosu $T4/T3 = 1,38/0,61$, tj. rastopa ima 2,3 puta više nego kristala.

Na dijagramu Fe-C mogu se pratiti strukturne promjene koje se događaju u legurama ugljika i željeza različitog sastava kad im se mijenja temperatura. Budući da su za svojstva čelika važne promjene koje se zbivaju u polju *NIESGN* dijagrama

Fe- Fe_3C , za praćenje promjena u čvrstom čeliku zanimljiv je samo krajnji lijevi dio dijagrama do sadržaja 2,06% C, i to samo metastabilni sistem (izvučene linije). Kakve sve mogu biti strukture legura Fe-C u tom području dijagrama prikazat ćemo promatraljući koje se sve strukturne promjene zbivaju u leguri određenog sastava kad se polako hlađi (tako polako da se na svakoj temperaturi uspostavlja ravnoteža) od temperature iznad tačke topljenja do sobne temperature. Uzmimo najprije kao primjer leguru sa 1,37% C (X_1 u sl. 14). Hlađenje te legure prikazano je u dijagramu pomicanjem njezine figurativne tačke naniže po vertikali koja prikazuje konstantni sadržaj X_1 . Kad se rastopljena legura ohladi na temperaturu prikazanu sjecištem te vertikale s likvidusom ABC (tačka 1), počinje izlučivanje kristala iz rastopa. Kristali koji se izlučuju jesu tzv. γ -kristali (gama-kristali), koji predstavljaju čvrsti rastvor ugljika u γ -željezu. Sadržaj ugljika u prvim kristalima koji se izlučuju iz rastopa prikazan je tačkom 2 na solidusu IE; pri daljem hlađenju u γ -kristalima koji se izlučuju i u kristalima koji su već izlučeni rastvara se sve više ugljika (prema liniji IE), a kako je sadržaj ugljika u izlučenim kristalima znatno manji nego u rastopu iz kog se izlučuju, to rastop postaje relativno sve bogatiji ugljikom i tačka topljenja mu opada (prema liniji BC). Kad temperatura padne na tačku prikazanu sjecištem vertikale sa solidusom, očvrsne posljednja kap rastopa (sastava 3) i po ohladiju do ispod solidusa legura se sva sastoji od homogenih γ -kristala sa sadržajem ugljika prema tački 4 (γ -kristali kao strukturalni sastojak čvrstog čelika nazivaju se austenit po engleskom metalurgu W. C Roberts-Austenu.) Ta struktura čelika ostaje pri daljem hlađenju nepromijenjena dok se čelik ne ohladi na temperaturu koja odgovara sjecištu vertikale s linijom ES (tačka 5). Pri daljem hlađenju počinje se u čvrstom stanju zbivati nešto analogno kristalizaciji u rastopu. Kao što se ovaj »raspada« na kristale (sa sastavom prema solidusu) i koncentrovaniji rastop (sa sastavom prema likvidusu), tako se austenit raspada na cementit (Fe_3C , zvan sekundarnim za razliku od primarnog, koji se izlučuje izravno iz rastopljene legure sa više od 4,3% C ispod likvidusa CD) i na manje koncentrovani austenit prema liniji ES. Kad temperatura padne na 723 °C (tačka 6, sjecište s linijom SK), austenit koji je ostao neraspadanu ima sastav prema tački S. Kako legura sa sastavom prema tački S ima oštru tačku raspada (budući da su se u njoj tačke početka i kraja raspadanja spojile), a ispod 723 °C ne mogu u ravnoteži postojati γ -kristali, nego samo α -kristali (čvrsti rastvor ugljika u α -željezu, zvan ferit, v. prilog) sa mnogo manje C, to se preostali austenit, čim temperatura padne ispod 723 °C, sav odjednom raspada pri konstantnoj temperaturi na α -kristale sastava P i cementit; budući da istovremeno nastaju, ta dva sastojka izlučuju se kao smjesa sitnih kristala ili tankih lamela. Takva smjesa, kad nastaje raspadom čvrste faze, naziva se eutektoid (tj. »slična eutektiku«), jer je analogna smjesi koja nastaje kad očvrsne rastop na temperaturi minimuma tačke topljenja (npr. u tački C dijagrama Fe-C) i koja se stoga naziva eutektik (grč. εύ eu dobro i τηκτός tektos rastopljen). Ta eutektoidna smjesa α -kristala i cementita kad je fino lamelarne strukture ima pod mikroskopom sedefast sjaj poput bisera, pa je zato kao strukturalni sastojak čelika nazvana perlit. Ispod 723 °C na se čelik prema tome (u ravnotežnom stanju) sastoji od perlita i (ranije izlučenog) sekundarnog cementita (v. prilog); pri daljem hlađenju mu se struktura ne mijenja, jedino sadržaj ugljika u α -kristalima u ravnoteži neznatno opada prema liniji PQ i na granicama α -kristala izlučuje se tzv. tertiarni cementit.

Čelik koji smo promatrali imao je veći sadržaj ugljika nego eutektoid ili perlit ($X_1 > 0,80\%$ C), on stoga ide u čelike koji se nazivaju nadektektoidni, natperlitni ili hipereutektoidni. Čelik koji ima upravo 0,80% C (sastav prema tački S) sastoji se samo od eutektoida (perlita) i naziva se eutektoidnim ili perlitnim (v. prilog), čelik sa $< 0,80\%$ C naziva se podeutektoidnim, potperlitnim ili hipoeutektoidnim.

Promjene u ravnotežnoj strukturi podeutektoidnog čelika mogu se razabratiti iz dijagrama Fe-C ako se slijedi vertikala koja prikazuje konstantan sastav $X_2 < 0,86$ (npr. 0,65% u sl. 14). Austenit je u ovom slučaju mogao nastati i raspadom tzv. δ -kristala (koji su u stvari isto što i α -kristali, v. str. 46) prema lijevom gornjem dijelu dijagrama; kad se on ohladi na temperaturu tačke 5', počinje

se raspadati na α -kristale i γ -kristale veće koncentracije ugljika. Pri daljem hlađenju α -kristalima se neznatno povećava (inače vrlo mali) sadržaj ugljika, ali na 768 °C (kad vertikala sjecište liniju MOS) prelazi iz paramagnetenog (nemagnetenog) u feromagneten (magneten) stanje (v. str. 46). Na 723 °C (sjecište 6' s linijom PS) preostali austenit očvrsne u perlit, te se ispod te temperature podeutektoidni čelik u ravnoteži sastoji od perlita i ranije izlučenih α -kristala. Budući da je ferit mnogo mekši od cementita, podeutektoidni čelici su na običnoj temperaturi u ravnotežnom stanju mekši od nadektektoidnih. Čelik kojem je sastav prikazan nekom tačkom nalijevo od linije GPQ sastoji se na sobnoj temperaturi samo od ferita, ev. s tertijskim cementitom (v. prilog).

Pri grijanju čelika nastaju (pod uslovima postizanja ravnotežnih stanja) iste strukturne promjene kao pri hlađenju, samo u obrnutom smislu: na 723 °C perlit se pretvara u austenit istog sastava, pri daljem grijanju austenit u nadektektoidnim čelicima postaje sve bogatiji ugljikom na račun sekundarnog cementita, a u podeutektoidnim čelicima sve siromašniji ugljikom na račun ferita, sve do sjecišta vertikale s linijom SE, odn. GS, onda se ne mijenja do sjecišta sa solidusom, kad počinje da se topi. Za vrijeme topljenja, između solidusa i likvidusa, sve više austenita prelazi u tečno stanje i istovremeno još nerastopljeni austenit postaje sve siromašniji ugljikom, dok se na temperaturi sjecišta vertikale s likvidusom i posljednji kristal austenita ne rastopi. Ako je sadržaj ugljika u čeliku manji od 0,5% C, kristali austenita prije topljenja prelaze u δ -kristale.

Analogno kao za čisto željezo (v. sliku 8), tako se i za legure željeza temperature faznih prelaza označuju slovom A s odgovarajućim indeksom: A_1 je temperatura tačke S u dijagramu (perlitra tačka), A_2 je temperatura prelaza magnetskog α -željeza u nemagnetsko α -željezo (sjecište s linijom MOS), A_3 temperatura prelaza α -željeza u γ -željezo i obrnuto (sjecište s linijom GS), A_{cm} temperatura početka izlučivanja sekundarnog cementita (sjecište s linijom SE). Kad bi se hlađenje i grijanje moglo provesti beskonačno sporo, navedene bi tačke predstavljale ravnotežne temperature te bi bile jednakе za hlađenje i za grijanje. Ako se temperatura mijenja praktičnom (konačnom) brzinom, nastaje mjerljivo zakašnjavanje faznih prelaza (histereza), tj. da bi se proizvela promjena, treba čelik zagrijati na nešto višu temperaturu, odn. ohladiti na nešto nižu temperaturu nego što odgovara ravnotežnoj temperaturi. Da bi se razlikovale temperature prelaza određenih uz sporo (ali konačno brzo) hlađenje od temperatura određenih uz (sporo) grijanje, uz oznaku A meće se za prve slovo r (franc. refroidissement), a za druge slovo c (chauffement), npr. A_{cr} , A_{ar} .

Kašnjenja u nastupanju faznih promjena pri više ili manje brzom hlađenju čelika predstavljaju osnovu za poboljšanje njegovih svojstava termičkom obradom, kako ćemo u glavnim crtama (za ugljične čelike) izvesti sad u nastavku, a podrobniye u poglavljiju Termička obrada čelika u ovom članku.

Fazne promjene pri bržem hlađenju čelika. Promjene prikazane u dijagramu Fe-C vezane su uz difuzijske procese. Npr., da bi se austenit nekog nadektektoidnog čelika na određenoj temperaturi izmenio A_1 i A_3 dijelom preobrazio u cementit, višak ugljika, koji se zbog njegove manje rastvorljivosti u γ -željezu izlučio u unutrašnjosti prostorne rešetke austenita, mora u čvrstom stanju difundirati kroz rešetku prema granicama zrna, da bi se tamo nakupio u dovoljnoj koncentraciji za stvaranje karbida Fe_3C . U podeutektoidnom čeliku na istoj temperaturi, poslije pretvorbe γ -željeza u α -željezo (u kojem je C gotovo nerastvorljiv) ugljik izlučen u unutrašnjosti rešetke difundira prema granicama zrna, tvoreći tamo čvrsti rastvor veće koncentracije. Budući da je difuzija spor proces (i to s tim sporiji što je temperatura niža), fazne se promjene mogu provesti dokraj prema dijagramu Fe-C samo ako se čelik zadrži na svakoj temperaturi kroz dovoljno dugu vrijeme; ako se čelik hlađi povećanom brzinom, dogada se da nema dovoljno vremena za završenje procesa difuzije, ili da još prije nego što je proces difuzije i mogao početi, temperatura padne na vrijednost pri kojoj je on praktički beskonačno spor. Uslijed toga nastupaju pri takvom ubrzanim hlađenju fazni preobražaji na nižim temperaturama nego što su ravnotežne (ili ne nastupaju uopće), a nakon hlađenja nalaze se u čeliku strukture koje su različite od struktura prema dijagramu ravnoteže. Odstupanja su od

ravnotežnih temperatura to veća što je veća brzina hlađenja, a strukture se razlikuju također prema sastavu legure i prema temperaturi na kojoj se brzo hlađenje obustavlja.

Ti su odnosi prikazani na dijagramu sl. 15. U njemu je prikazano kako se mijenjaju preobražajne temperature s brzinom hlađenja i kakve strukture pri tom nastaju. Kad raste brzina hlađenja, tačke se A_{α} i A_1 jedna drugoj približavaju i pri određenoj brzini hlađenja i na određenoj temperaturi (zavisno od sastava čelika) one se spajaju, tako da se iznad te brzine hlađenja izlučuju zajedno ferit i cementit, tj. izlučuje se samo perlit, mada čelik nije eutektoidan. Struktura tako nastalog perlita tako je fino heterogena da je pod mikroskopima malog povećanja, kojima su se služili u počecima metalografije, izgledala homogena, različita od strukture perlita (v. prilog), pa je tom strukturnom sastojku dano posebno ime, *sorbit*, prema engleskom metalurgu H. C. Sorbyju. Ako se čelik ohladi na određenu dovoljno nisku temperaturu određenom brzinom koja se naziva *donjom kritičnom brzinom ohlađivanja*, ili brzinom većom od nje, ne raspada se sav austenit na ferit i cementit, nego sve veći dio pretvara se u strukturni sastojak obrazovan od igličastih kristala u grupama koje se ukrštavaju pod određenim kutovima (v. prilog); taj strukturni sastojak, koji je vrlo tvrd i vrlo otporan prema metalografskim reagencijama, nazvan je *martenzit* (prema njemačkom metalurgu A. v. Martensu). Martenzit predstavlja prezasićeni rastvor ugljika u α -željezu; zbog velike brzine ohlađivanja ugljik ne dospijeva da difundira kroz α -kristale prije nego se čelik ohladi na temperaturu na kojoj je brzina difuzije praktično jednaka nuli. Atomi ugljika u prezasićenom rastvoru deformiraju kubnu (prostorno centriranu) rešetku α -željeza tako da ona postane tetragonska i posjeduje neku unutarnju napetost kojom se objašnjava velika tvrdoća i otpornost martenzita. Martenzitna struktura karakteristična je za zakaljeni čelik i uslovjava njegovu čvrstoću i tvrdoću. Kako se vidi na dijagramu sl. 15, temperatura na kojoj se počinje stvarati martenzit (*martenzitna tačka M_s*) ne zavisi od brzine ohlađivanja, ali ona zavisi od sastava legure, od temperature sa koje se čelik ohlađuje (*temperatupe kaljenja*) i postupku kojemu je čelik prije ohlađivanja bio podvrgnut. Iznad brzine hlađenja koja se zove *gornja kritična brzina hlađenja austenit* se uopće ne dospije rasplasti na ferit i cementit, pa se u čeliku koji je ohlađen brzinom većom od gornje kritične sa temperature iznad A_3 nalazi samo martenzit. Ako se čelik sa temperature iznad A_3 ohladi brzinom između donje i gornje kritične, jedan se dio austenita dospije rasplasti u perlit, koje se znatno lakše nagriza metalografskim

reagencijama nego otporni martenzit, pa se pod mikroskopom razmjerno malog povećanja prikazuje u obliku tamnih mrlja u obliku rozeta, uloženih u svjetli martenzit (v. prilog). Taj strukturni sastojak, kojemu se lamelarna heterogena struktura može vidjeti samo pod elektronskim mikroskopom, bila je nazvana *trostitom* (prema engleskom metalurgu L. Troostu). Ako se čelik ohladi sa temperature ispod A_s , ali iznad A_1 , brzinom iznad kritične, dobivaju se strukture koje pored martenzita (i ev. trostita) sadrže ferit, odr. sekundarni cementit. Na slici 16 prikazano je kako se uslijed kašnjenja preobrazbe austenita pomjeraju linije *GOSE* i *PSK* uz različite brzine hlađenja i koje strukture pri tom nastaju. Kako se u toj slici vidi, tipični lamelarni perlit ne predstavlja strukturu ravnotežnog stanja, već se u svom (meta)-stabilnom stanju perlit sastoji od sitnih kuglica (sfera) cementita uloženih u feritnoj matici. Budući da takav perlit ima neka povoljna mehanička svojstva, ponekad se duljim grijanjem na temperaturi tili ispod A_1 lamelarni cementit pretvara u sferoidni. Ta se termička obrada zove *sferoidizacija*.

U prisutnosti razmjerne malih količina nekih pratećih ili legirajućih elemenata u čeliku, istovremeno izlučivanje ferita i cementita zbiva se po drugom mehanizmu nego pri stvaranju perlita, pa se u čeliku pojavljuje strukturni sastojak koji se naziva po američkom metalurgu E. C. Bainu *bainit* (također struktura međustepena, međustruktura, jer, kako je prikazano na sl. 15, nastaje na temperaturi između temperaturâ stvaranja perlita i stvaranja martenzita). Bainit se sastoji od više ili manje izrazitih iglica ferita, među kojima se nalaze uloženi karbidi (v. prilog).

Kad je velika krtost kaljenog čelika nepoželjna, on se podvrgava *naruštanju*, tj. grijanju na temperature ispod A_c . Pri tom nastaju ili se nastavljaju preobražaji koji su naglim hlađenjem ili prekinuti ili sprječeni. Martenzit se najprije pretvara na meku i žilaviju finodisperznu i kemijski manje otpornu smjesu ferita i cementita koja još zadržava igličastu strukturu (ta je smjesa nazvana trostite napuštanja ili *osmondit*, prema francuskom metalografu F. Osmundu). Pri daljem grijanju se zbog izlučivanja kuglica cementita igličasta struktura gubi i na kraju se dobiva više ili manje jednoljuna smjesa zrnatog cementita u feritnoj osnovnoj masi.

Trostitom napuštanju (a analogno i sorbitom napuštanju) nazvane su strukture napuštanja koje imaju jednaku tvrdoću kao sorbit i trostite pri ohlađivanju čelika. Ti nazivi nemaju metalografskog opravdanja i stoga se napuštaju — s tim više što se i opisujući strukture koje nastaju pri ohlađivanju čelika govori sve manje o sorbitu i trostitu, jer se tim izrazima označeni sastojci promatrani sa velikim povećanjima načelno ne razlikuju od perlita, a osim toga su ti izrazi metalografski donekle jednoznačni samo kod čistog ugljičnog čelika, a inače se nijesu označene strukture teško razlikuju od bainita.

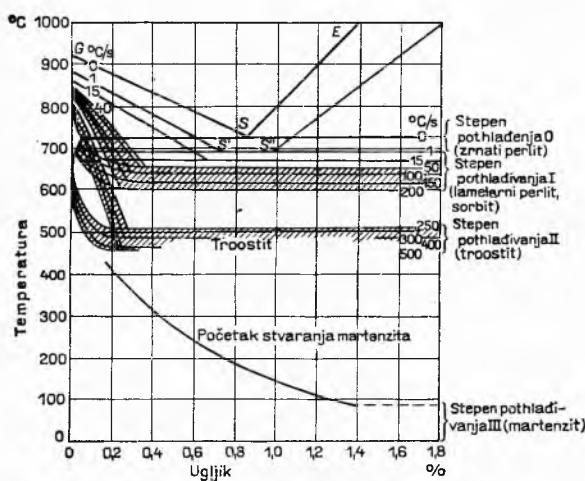
Dijagrami temperaturne transformacije (TT). U novije vrijeme izrađeni su za potrebe prakse termičke obrade nove vrste dijagrama koji prikazuju strukturne pretvorbe u zavisnosti od vremena, i to bilo kad se čelik drži na određenoj temperaturi na koju je bio naglo ohlađen (*dijagram izotermne temperaturne transformacije — ITT*) bilo kad se kontinuirano hlađe različitim brzinama (*dijagram kontinuirane temperaturne transformacije — KTT*). U tim dijagramima nanesena je kao ordinata temperatura, a kao apscisa vrijeme u logaritamskom mjerilu. Sl. 17 prikazuje ITT-dijagram ugljičnog čelika sa 0,44% C. Krajnja lijeva krivulja na dijagramu prikazuje vrijeme početka preobražaja austenita u druge strukturne elemente, u zavisnosti od temperature na kojoj se čelik drži nakon naglog hlađenja na tu temperaturu sa temperaturom na kojoj je čelik držan kroz dovoljno vrijeme da struktura postane austenitna (*temperatura austenitizacije*, za podeutektoidne čelike nešto iznad A_{c_s}). Krajnja desna krivulja prikazuje vrijeme kraja preobražaja; nakon tog vremena ne nastaju u čeliku više nikakve strukturne promjene. Vidi se da te krivulje pokazuju izraziti minimum (to znači, maksimum brzine kojom preobražaj počinje, a tome odgovara po pravilu i maksimum brzine kojom se preobražaj odvija). Srednja krivulja prikazuje početak preobražaja iz ferita u perlit. Vodoravni pravac M_s označuje temperaturu ispod koje se austenit u naglo ohlađenom čeliku pretvara u martenzit, a crtkane, tom pravcu paralelne linije prikazuju temperature na kojima je uz njih napisani procenat austenita prešao u martenzit.

Na prikazanom dijagramu preobražaj na temperaturi maksimuma brzine preobražaja odmah počinje; čelici koji se podvrgavaju kaljenju redovito imaju krivulje pomjerene udesno, tj. na temperaturi maksimuma potrebno je da prođe neko vrijeme prije

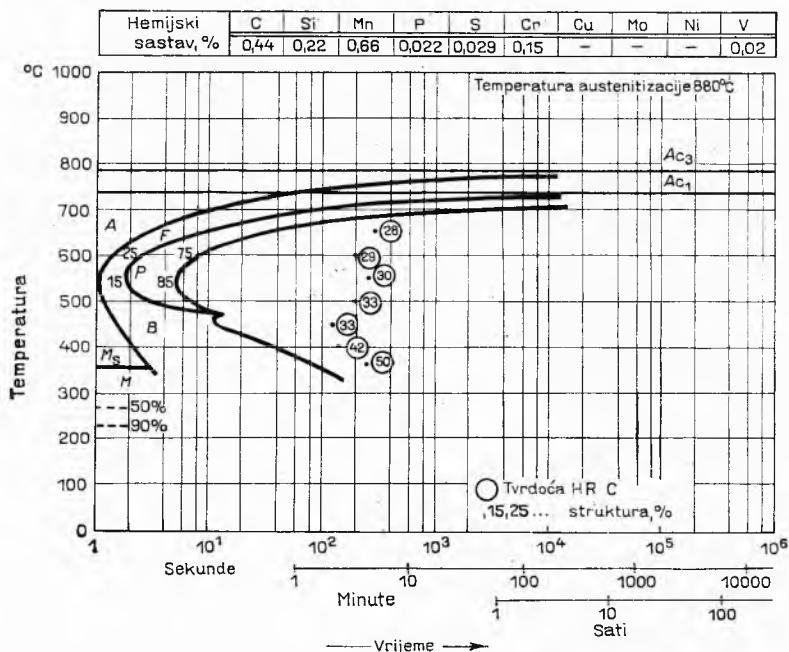


Sl. 15. Zavisnost preobražajnih temperatura od brzine ohlađivanja

naferit i cementit, nego sve veći dio pretvara se u strukturni sastojak obrazovan od igličastih kristala u grupama koje se ukrštavaju pod određenim kutovima (v. prilog); taj strukturni sastojak, koji je vrlo tvrd i vrlo otporan prema metalografskim reagencijama, nazvan je *martenzit* (prema njemačkom metalurgu A. v. Martensu). Martenzit predstavlja prezasićeni rastvor ugljika u α -željezu; zbog velike brzine ohlađivanja ugljik ne dospijeva da difundira kroz α -kristale prije nego se čelik ohladi na temperaturu na kojoj je brzina difuzije praktično jednaka nuli. Atomi ugljika u prezasićenom rastvoru deformiraju kubnu (prostorno centriranu) rešetku α -željeza tako da ona postane tetragonska i posjeduje neku unutarnju napetost kojom se objašnjava velika tvrdoća i otpornost martenzita. Martenzitna struktura karakteristična je za zakaljeni čelik i uslovjava njegovu čvrstoću i tvrdoću. Kako se vidi na dijagramu sl. 15, temperatura na kojoj se počinje stvarati martenzit (*martenzitna tačka M_s*) ne zavisi od brzine ohlađivanja, ali ona zavisi od sastava legure, od temperature sa koje se čelik ohlađuje (*temperatupe kaljenja*) i postupku kojemu je čelik prije ohlađivanja bio podvrgnut. Iznad brzine hlađenja koja se zove *gornja kritična brzina hlađenja austenit* se uopće ne dospije rasplasti na ferit i cementit, pa se u čeliku koji je ohlađen brzinom većom od gornje kritične sa temperature iznad A_3 nalazi samo martenzit. Ako se čelik sa temperature iznad A_3 ohladi brzinom između donje i gornje kritične, jedan se dio austenita dospije rasplasti u perlit, koje se znatno lakše nagriza metalografskim



Sl. 16. Uticaj sadržaja ugljika i brzine hlađenja na preobražajne temperature i strukturu ugljičnih čelika



Sl. 17. Dijagram izotermne temperaturne transformacije (ITT)

nego će nastati strukturalna promjena. Što je udaljenost između maksimuma i osi ordinata manja to je potrebna veća brzina hlađenja da bi se austenit bez pretvorbe u ferit i perlit ohladio na temperature stvaranja martenzita. Obrnuto, svi uticaji koji tu udaljenost povećavaju, time smanjuju kritičnu brzinu hlađenja.

Gornji dio dijagrama, u kojem se nalaze tri krivulje, predstavlja područje perlitnog preobražaja (perlitni stepen); u njemu se mogu razabrati vremena i temperature potrebne da se dobije feritna struktura i/ili perlitna struktura. Srednji dio dijagrama (gdje su svega dvije krivulje) predstavlja područje bainitnog preobražaja (bainitni stepen), u njemu se može pratiti izravni preobražaj austenita u bainitnu strukturu. Donji dio dijagrama, ispod pravca M_s , predstavlja područje martenzitnog preobražaja. U tom području ne postoji linija završetka preobražaja zavisna od vremena, nego količina transformirane strukture zavisi samo od temperature. Temperatura završetka martenzitnog preobražaja (M_f) zavisi od sadržaja ugljika i već za ugljične čelike sa više od 0,6% C ona se nalazi ispod sobne temperature.

Zbog toga se u nadeutektoidnim zakaljenim čelicima nalazi uz martenzit i zaostali (neraspadnuti) austenit.

ITT-dijagrami imaju praktičnu vrijednost samo za izotermne postupke termičke obrade, za kaljenje ohladijanjem, prema tome, samo kad su dimenzije čeličnih komada koji se zakaljuju tako male da se u najkraćem vremenu izjednačuje temperatura komada s temperaturom kupke. U većini slučajeva predmeti većih dimenzija zakaljuju se u kupama čija je temperatura u martenzitnom području ITT-dijagrama, pa se temperatura u komadiju koji se zakaljuje s vremenom kontinuirano mijenja. Za određivanje najracionalnijeg postupka termičke obrade u takvim slučajevima korisni su dijagrami kontinuiranog hlađenja (dijagrami KTT). U njima su, polazeći od vremena prolaza preko temperature Ac_3 , ucrteane krivulje promjene temperature s vremenom za različite brzine hlađenja. Promjene strukture treba pratiti uzduž tih krivulja. Slika 18 prikazuje takav dijagram za isti čelik za koji vrijedi dijagram slika 17. Na kraju svake krivulje hlađenja naznačena je tvrdoća čelika koji je po toj krivulji ohluden na sobnu temperaturu. Krivulje preobražaja u dijagramima KTT općenito su u odnosu na krivulje dijagrama ITT za isti čelik pomjerene nešto prema duljim vremenima (udesno) i prema nižim temperaturama (dolje).

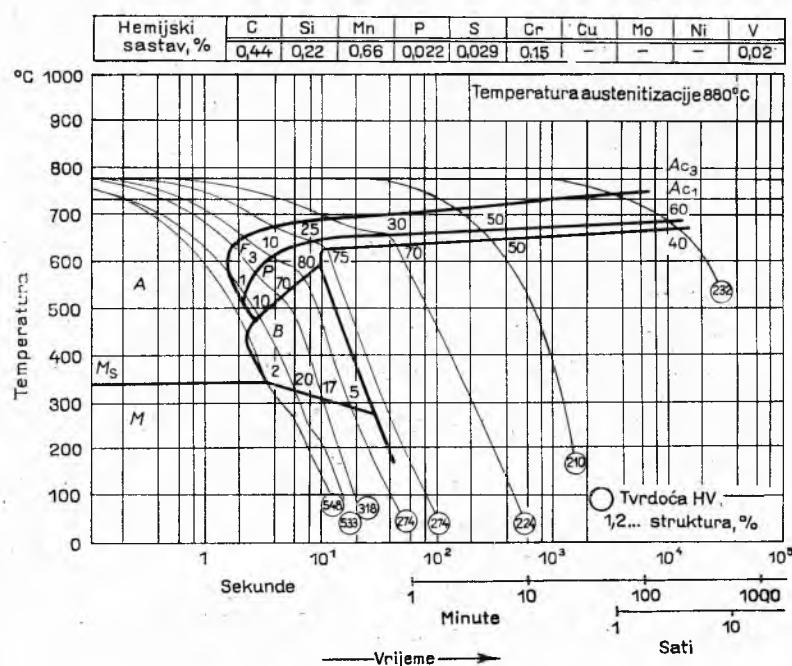
Na tok krivulja preobražaja u dijagramima ITT i KTT utječe pretežno hemijski sastav čelika, ali osim njega može utjecati i veličina austenitnog zrna, količina i karakter inkluzija u čeliku, temperatura i vrijeme austenitizacije. Više temperature i dulja vremena austenitizacije pomiču krivulje preobražaja udesno prema duljim vremenima jer u austenitu onda ostaje manje kristalacijskih klica i on je uslijed toga postojaniji.

Dijagrami TT, čije je sastavljanje na osnovu dilatometrijskih mjerjenja, mjerjenja tvrdoće i mikroskopskih istraživanja strukture spojeno s velikim troškovima, skupljeni su i zbog njihove korisnosti u praksi termičke obrade publikovani u atlasima za različite čelike — naročito i legirane — i za različite temperature austenitizacije. (V. također *Fazne ravnoteže i Metalografija*.)

Legirani čelik

Pored ugljika, kao najvažnijeg pratioca željeza, sa željezom se može legirati i niz drugih elemenata. Legiranjem s kromom, niklom, molibdenom, volframom, vanadijumom, bakrom, manganom, silicijumom i — rijeci — nekim drugim elementima u različitim omjerima i kombinacijama dobivaju se čelici koji se zbog svojih specifičnih osobina i specijalnog načina proizvodnje i prerade nazivaju *specijalnim čelicima*.

Binarni dijagrami stanja legura željeza. Kako će dodatak pojedinog legirajućeg elementa utjecati na strukturu, a time i na svojstva čelika, u izvjesnoj se mjeri može predvidjeti prema obliku binarnog dijagrama stanja sistema željezo-legirajući element. (Samo u izvjesnoj mjeri zbog toga što se binarni dijagrami odnose na stanje ravnoteže, koje u praksi gotovo nikad nije postignuto, i zbog toga što legirani čelici praktično nikad nisu binarne legure, nego sadrže gotovo uvijek takode ugljik i druge prateće ili legirajuće elemente.) Opći karakter dijagrama stanja željezo-legirajući element zavisi u prvom redu od uticaja dodatka na alotropiju željeza, tj. temperature preobražaja α -(odn. δ)-željeza u γ -željezo, i na rastvorljivost legirajućeg elementa u željezu (sposobnosti da s njime tvori miješane kristale). Prema tome se legirajući elementi mogu razdjeliti u dvije grupe: elemente koji povećavaju temperaturni interval između temperatura A_3 i A_4 (koji proširuju temperaturno područje egzistencije γ -željeza) i elemente koji taj temperaturni interval smanjuju (sužavaju pod-



Sl. 18. Dijagram kontinuirane temperaturne transformacije (KTT)

ruje γ -željeza), i svaka se od tih grupa može podijeliti u dvije podgrupe prema tome da li je legirajući element rastvorljiv u čvrstom željezu u svakom omjeru ili mu je rastvorljivost ograničena. Elementi koji poput γ -željeza imaju kubnu plošno centriranu prostornu rešetku po pravilu šire temperaturno područje γ -željeza, a oni koji imaju kubnu prostorno centriranu rešetku poput α - (odn. δ -) željeza, proširuju po pravilu temperaturno područje egzistencije α - (odn. δ -) željeza, tj. sužavaju područje egzistencije γ -željeza.

Tipičan sistem željeza i elementa koji proširuje γ -područje a u čvrstom je željezu rastvorljiv u svakom omjeru predstavlja na primjer sistem Fe-Mn (v. sl. 20). Dodatak legirajućeg elementa povisuje temperaturu A_3 i snižuje temperaturu A_4 ; područje čvrste otopine legirajućeg elementa u γ -željezu (γ -područje) nije prema većim sadržajima legirajućeg elementa i prema nižim temperaturama ničim ograničeno (govori se o *otvorenom γ -području*). Kad je sadržaj takvog elementa nešto veći, γ -faza (austenit) može biti stabilna i na sobnoj temperaturi (*austemtni čelici*). Takav dijagram sa željezom daju od važnijih legirajućih elemenata Ni, Co, Mn.

Ako je legirajući element u čvrstom γ -željezu ograničeno rastvorljiv, γ -područje je sa svih strana opkoljeno područjima heterogenih ravnoteža. Najvažniji je primjer takvog dijagrama dijagram željezo-ugljik (v. sl. 13). Drugi elementi koji daju takve dijagrame jesu Cu i N. Kad se oni dodaju čeliku koji sadrži ugljik, djelovanje se ugljika i tih elemenata sumira, pa se dobivaju dijagrami s *proširenim γ -područjem* (u odnosu na dijagram Fe-C).

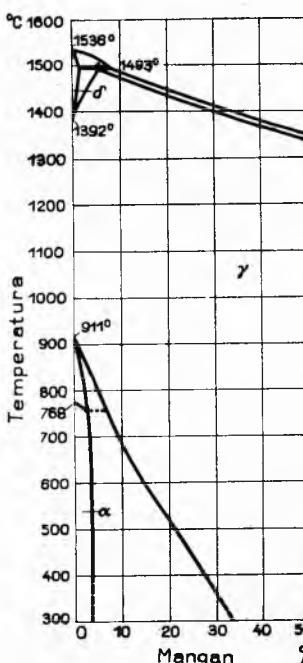
Sistem željeza i elementa koji γ -područje sužava a neograničeno je rastvorljiv u α - (odn. δ -) željezu predstavlja sistem Fe-Cr (v. sl. 25). Dodatak elementa snižava temperaturu A_4 a povisuje temperaturu A_3 , linije koje prikazuju to povišenje odn. snižavanje s porastom sadržaja legirajućeg elementa na kraju se sastaju i zatvaraju područje γ -željeza (*zatvoreno γ -područje*). Takav dijagram daju legirajući elementi Cr, Mo, W, V, Ti, Si, Al. Kod većeg sadržaja tih elemenata u čeliku na svim je temperaturama od tačke taljenja do sobne temperature stabilna α -faza (ferit); takvi se čelici stoga zovu feritni čelici. Tipičan dijagram za legure željeza s elementima koji proširuju α - (odn. δ -) područje na račun γ -područja, a u željezu su ograničeno rastvorljivi, predstavlja dijagram Fe-Nb (v. sl. 34). U njemu su α -linije i δ -linije dijagrama Fe-C u neku ruku zamjenile mjesta, a γ -područje je suženo (*suženo γ -područje*). Ovakav dijagram daju elementi koji se za tehničke legure sa željezom u praksi malo upotrebljavaju: niob, tantal, cirkonijum, cer.

Iz naprijed izloženog može se predvidjeti i uticaj legirajućih elemenata na dijagramu TT. Kako je već rečeno, djelstvo legirajućih elemenata u tehničkim legurama željeza sumiraju se sa djelstvom ugljika. Stoga elementi koji proširuju γ -područje, pomjerajući naniže linije feritnog preobražaja A_3 (a time i perlitnog preobražaja A_1) snižuju temperaturu austenitizacije; time se usporavaju difuzijski procesi koji predstavljaju osnovu za preobražaje u perlitnom području dijagrama TT i pomjeraju se linije preobražaja udesno, tj. povećava se prolaz pred maksimumom tih dijagrama i time smanjuje kritična brzina hladjenja za stvaranje martenzita. Kad je kritična brzina hladjenja manja, pri kaljenju čelika zona u kojoj se je austenit preobrazio u martenzit ima vremena da prodre dublje s površine u unutrašnjost zakaljivanog komada — kaže se da je *prokaljivost čelika* veća. Povećanjem sadržaja nekih elemenata ove grupe snižava se također temperatura početka stvaranja martenzita (M_s); ako je sadržaj legirajućeg elementa dovoljno velik (naročito Mn i Ni), martenzit se počinje stvarati tek na temperaturama ispod 0 °C, tj. austenitna struktura ostaje sačuvana i na sobnoj temperaturi. Očekivalo bi se da će elementi koji sužavaju γ -područje djelovati suprotno nego elementi koji to područje proširuju, tj. da će pogodovati stvaranju ferita, sprečavati stvaranje austenita i povećavati kritičnu brzinu. U stvari, neki elementi te grupe u praksi djeluju jednako kao elementi koji γ -područje proširuju. Djelovanje tih elemenata na kritičnu brzinu objašnjava se time što ti elementi tvore s ugljikom karbide, čije rastvaranje zahtijeva višu temperaturu austenitizacije, i što njihova prisutnost u kristalnoj rešeci usporava procese difuzije ugljika i željeza pri feritnom i perlitnom preobražaju. Te dvije činjenice mnogo jače djeluju u smislu smanjivanja brzine hladjenja nego što u smislu njenog povećanja djeluje pomjeranje temperatura A_3 i A_4 . Primjer za spomenuto djelovanje jest najpoznatiji nerdajući čelik sa 8% Ni i 18% Cr, u kojem tek dodatak kroma (elementa koji sužava γ -područje) toliko pojačava djelovanje nikla (elementa koji γ -područje proširuje) da je taj čelik nakon odgovarajuće topilinske obrade čisto austenitan.

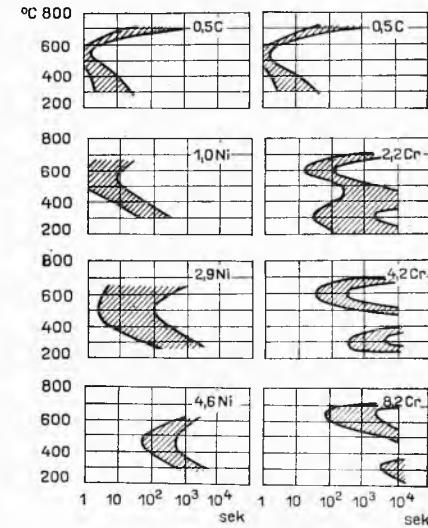
Pored toga što legirajući elementi djeluju, kako je naprijed izloženo, na položaj krivulja u dijagramu TT, oni mogu djelovati i na oblik tih krivulja. Slika 19 prikazuje kako se razlikuju dijagrami ITT za čelike koji pored 0,5% C sadrže sve veće količine Ni i Cr. Vidi se da dok dodatak nikla poviše krivulje udesno ne mijenjajući bitno njihov oblik, dodatkom se kroma perlitno i bainitno područje dijagrama sve više jedno od drugoga odvajaju, tako da su za čelik sa 4,2% Cr potpuno odvojeni, te na određenoj temperaturi između dva područja nestabilnosti austenita postoji temperaturni pojas u kojem je austenit stabilan. (Zbog tipičnog oblika krivulja u drugom dijagramu desno gore, krivulje dijagrama izotermne temperaturne transformacije općenito su se nazivale i *S-krivuljama*.)

Nakon ovih općenitih razmatranja o binarnim dijagramima željezo-legirajući element, u nastavku će se, na osnovu pojedinih binarnih dijagrama, prikazati na koji način pojedini legirajući elementi utječu na strukturu, a time i na mehaničkotehnološka svojstva čelika, na kovnost, prokaljivost, rast zrna, osjetljivost prema pregrijavanju, i na specijalna svojstva, imajući pri tom u vidu istovremenu prisutnost ugljika i ev. daljih legirajućih elemenata.

Legure željeza s elementima koji proširuju γ -područje. Željezo-mangan (sl. 20). Legure željeza i mangana imaju prošireno γ -područje. Mangan jako snižuje temperaturu preobražaja γ -željeza u α -željezo; ali i u α -željezu nje-gova rastvorljivost dosta je velika. Zbog spore difuzije atoma mangana u rešeci γ -željeza, prelaz γ - α pri hladjenju nastaje na nižoj temperaturi nego što to prikazuje ravnotežni dijagram, a prelaz α - γ pri grijanju, na višoj. Zbog te histereze bit će u određenom području temperature prisutna ili faza α ili faza γ prema tome da li se u to područje dolazi s viših ili s nižih temperatura. Pri sadržaju mangana između 5 i 12%, na temperaturi preobražaja atomi željeza u plošno centriranoj γ -rešetki premetnu se u prostorno centriranu α -rešetku, dok atomi mangana ostaju na svojim mjestima (analogno kao atomi ugljika u martenzitu) izazivajući unutarnje napetosti i



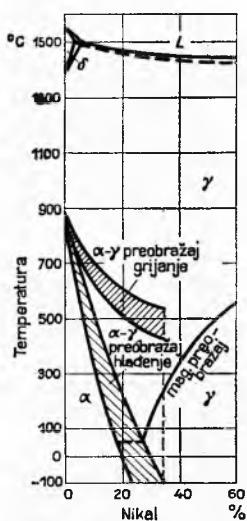
Sl. 20. Dijagram stanja željezo-mangan



Sl. 19. Uticaj sadržaja nikla i kroma na oblik krvulja dijagrama ITT

tvrdoću legure; ako sadržaj mangana prede 12%, prostorna se rešetka deformira u heksagonalnu. U prisutnosti ugljika mangan ne tvori odvojene karbide, nego ulazi u cementit tvoreći miješani karbid. Usljed smanjenja brzine difuzije i sniženja temperature preobražaja γ - α , smanjuje se kritična brzina za postanak martenzita (poboljšava prokaljivost); s raščim sadržajem mangana smanjuva se i temperatura stvaranja martenzita, tako da je za čelik sa 2% Mn i 2% C već ispod sobne temperature (*Maurerov austenitni čelik*). O tome kakva se struktura može očekivati u čelicima s različitim sadržajima mangana i ugljika, ohladeњim na zraku s temperaturom austenitizacije na sobnu temperaturu, može se razabratiti iz dijagrama strukture prema Guilletu (sl. 21).

Manganski čelici imaju sklonost ogrubljenja zrna na temperaturi austenitizacije, te su ti čelici stoga osjetljivi prema pregrijavanju prilikom kaljenja. Malim količinama Al_2O_5 , AlN ili V-karbida, kao kristalizacionim jezgrama, rast se kristala može spriječiti. Mangan pospješuje i stvaranje trakaste strukture u pravcu deformacije pri toplovaljanju, što loše utiče na mehaničke osobine u poprečnom smjeru. Mangan se dodaje u malim količinama (do 3%) nekim ugljičnim čelicima (koji se dobro kuju i zavaruju) radi povišenja njihove čvrstoće. U nekim specijalnim čelicima (*sitnozrnatim*) koji se dobro zavaruju i uz to imaju povišenu čvrstoću dodaju se i drugi legirajući dodaci, npr. Ni, Mo, V, B. Austenitni čelici sa 12...15% Mn odlikuju se žilavšću i otpornošću protiv habanja. Upotrebljavaju se stoga za dijelove izložene habanju (npr. u drobilicama, mlinovima itd.).



Sl. 22. Dijagram stanja željezo-nikal

Štovišće povisiti čvrstoću mekog čelika uz povišenje granice istezanja i uz razmjerne malo povećanje krtosti, ali — za razliku od mangana — naročito povoljno utiče na žilavost upravno na smjer valjanja. Također suprotno od mangana, nikal ne tvori karbide te pospješuje (ali manje nego silicijum) raspodjelu karbida željeza i smanjuje tendenciju zrna da raste na višim tem-

poperaturama. Slika 23 prikazuje, prema Guilletu, strukture čelika sa različitim sadržajem nikla i ugljika nakon što su bili na zraku ohlađeni s temperaturom austenitizacije. (Pri bržem hlađenju linije se pomjeraju naniže.) Legura sa 36% Ni ima naročito malen koeficijent toplinskog rastezanja do $\sim 200^\circ\text{C}$ i minimum električne i toplinske provodljivosti. U posljednjim godinama razviti su legirani čelici sa 18...25% nikla i vrlo niskim sadržajem ugljika, koji nakon otvrdnjavanja izlučivanjem postižu čvrstoće od 140...215 kp/mm². U specijalnim čelicima nikal redovito dolazi u zajednici s drugim legirajućim elementima. Austenitni čelici legirani s kromom i niklom otporni su prema kiselinama i prema visokim temperaturama, feritni čelici dodatkom nikla postaju otporniji prema vrućim alkalijama.

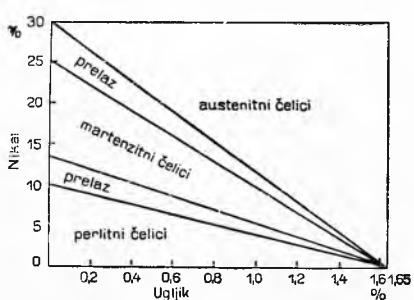
Čelici sa 1...5% Ni upotrebljavaju se zbog svoje čvrstoće i žilavosti za napregnute strojne dijelove, čelik sa $\sim 9\%$ Ni, od kojeg se zbog njegove žilavosti i razmjerne otpornosti prema koroziji prave cijevi pušaka i šipke za dubinsko bušenje, u novije vrijeme je razvit u hladnožilavi čelik koji se sve više upotrebljava.

Austenitni čelici sa $\sim 8\%$ Ni, $\sim 10\%$ Mn i 3...4% Cr upotrebljavaju se u elektrotehnici kao antimagnetski čelici.

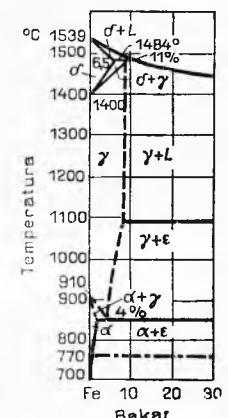
Željezo-kobalt. Poput nikla, i kobalt tvori sa željezom neprekinitut niz miješanih kristala, ali ne utiče na temperaturu preobražaja α - γ i legure Fe-Co pokazuju malu histerezu tog preobražaja. Kobalt s ugljikom ne tvori karbide, on povećava brzinu difuzionih procesa te time povećava kritičnu brzinu hlađenja. Kobalt sprečava rast zrna na temperaturi austenitizacije, pa čelici legirani s kobaltom nisu osjetljivi na pregrijavanje, čvrsti su i tvrdi i na višim temperaturama i imaju postojanu strukturu pri napuštanju. Kobalt je stoga legirajući element u brzoreznim čelicima. Kobaltni čelici imaju povoljna magnetska svojstva. Redovito se kobalt dodaje čeliku u kombinaciji s drugim legirajućim elementima.

Željezo-bakar (slika 24). Na svojoj lijevoj strani (za manje koncentracije bakra) dijagram Fe-Cu ima izvjesnu sličnost s dijagramom Fe-C; bakar proširuje γ -područje i rastvorljivost mu u α -željezu ispod eutektoidne temperature opada (na 850°C iznosi $\sim 1,4\%$ Cu, na sobnoj temperaturi samo 0,2%). Bakar smanjuje kritičnu brzinu hlađenja ali ne utiče na temperaturu početka stvaranja martenzita. Čelici sa $\sim 1\%$ Cu mogu se stoga očvršćavati bilo martenzitskim kaljenjem bilo izlučivanjem bakra iz rastvora u α -željezu pri hlađenju (prema sadržaju C i Cu preteže jedno ili drugo djelovanje). Bakar ne tvori karbide i ubrzava raspadanje karbida željeza i legirajućih metala. Usljed prisutnosti bakrenih predmeta (armatura itd.) u raskovu, tehnički čelici danas često sadrže 0,2...0,3% Cu kao prateći element. Čelici sa više od 0,15% Cu, naročito u kombinaciji s dodacima fosfora, otporniji su protiv atmosferske korozije nego obični ugljični čelici; razlog je tome što se stvara na njima sloj rde koja je zbog sadržaja bakra gušća i čvršća nego normalna rda. I premazi na čeliku koji sadrži bakar bolje drže pa su trajniji nego na čeliku bez bakra.

Željezo-dušik. Dušik djeluje na željezo slično kao ugljak. On širi γ -područje više nego ugljak, tvori sa željezom miješane kristale i tri nitrida: γ -nitrid Fe_4N , ζ -nitrid Fe_2N i ϵ -nitrid FeN . U nelegiranim čelicima s malim sadržajem ugljika dušik povećava sklonost k starenju i međukristalnoj koroziji, ali to se djelovanje smanjuje ili poništava ako čelik sadrži legirajuće ili prateće elemente koji s dušikom tvore odvojene teško topljive nitride (Ti, Zr, Ce, Al, V, Nb). U tom slučaju dušik djeluje povoljno na veličinu zrna i čvrstoću u hladnom i toplostanju. Za razliku od ugljika, dušik pod takvim okolnostima ne djeluje nepovoljno na otpornost prema koroziji i na žilavost. U feritnim čelicima s kromom površeni sadržaj dušika spriječava rast kristala i poboljšava obradljivost u toplostanju. Martenzitskim čelicima dušik, poput ugljika, povećava tvrdoću, ali ne smanjuje, kao ugljak, žilavost, rastegljivost i otpornost prema koroziji. Budući da dušik, kao i



Sl. 23. Dijagram strukture nikalnih čelika

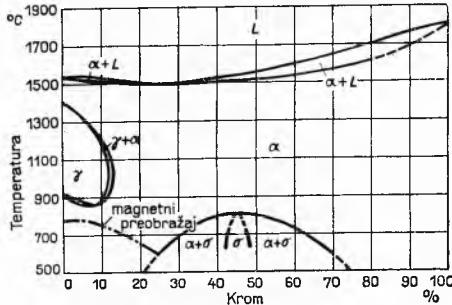


Sl. 24. Dijagram stanja željezo-bakar

nikal i mangan, proširuje γ -područje, on može jednim dijelom zamijeniti te elemente u austenitnim čelicima. Normalno čelici sadrže 0,001...0,04% N, prema postupku proizvodnje; u tehničkim legurama željeza, topljenim pod atmosferskim pritiskom, sadržaj dušika može se povisiti do 0,35%.

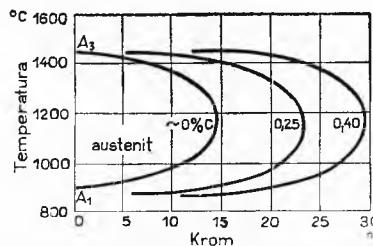
Željezo-bor. Bor se čelicima sve češće dodaje u malim količinama (niskolegiranim sa malo ugljika do 0,005% B, austenitnim čelicima čvrstim na vrlo visokim temperaturama, do 0,3% B) zbog povoljnog djelovanja na prokaljivost i na čvrstoću na visokim temperaturama. Zbog velikog koeficijenta apsorpcije bora za neutrone, čelici s većim dodacima bora upotrebljavaju se u nuklearnoj tehnici kao materijali za biološki štit i za regulatore nuklearnih reakcija.

Legure željeza s elementima koji sužavaju gama-područje. Željezo-krom (slika 25). Dijagram Fe-Cr ima zatvoreno γ -područje sa max. 12% Cr, dva uska područja u obliku polumjeseca gdje su stabilni i a - i γ -kristali, i veliko otvoreno a -područje. Prema tome se razlikuju: čelici legirani s kromom u kojima se mogu ili zbivati poznati preobražaji γ -faze ili zadržati



S1. 25. Dijagram stanja željezo-krom

γ -faza nepromijenjena (čelici sa preobražajnom ili s austenitnom strukturom); čelici u kojima je osim austenita i/ili produkata njegova preobražaja sadržana i α -faza (poluferitni čelici) i čelici samo sa α -fazom (feritni čelici). Osim toga vidi se u dijagramu da se na temperaturama ispod 800 °C i pri sadržajima kroma između ~ 20 i 75% (u tehničkim čelicima između 30 i 65%) pojavljuje tzv. σ -faza; to je tvrdi, krti nemagnetski intermetalni spoj FeCr, koji u čelicima navedenog sastava može izazvati krtost ako se pogodnom termičkom obradom ne ukloni. Uvijek prisutni ugljik proširuje γ -područje kako to pokazuje slika 26 za sadržaje ugljika



Sl. 26. Zavisnost opsega γ -područja od sadržaja ugljika u legurama Fe-C-Cr

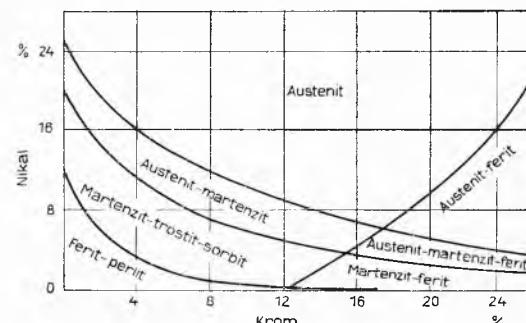
od 0,25 i 0,40% C. Krom s ugljikom tvori odvojene karbide različitog sastava, naročito Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 i Cr_3C_2 , a može i da djelično zamjenjuje željezo u cementitu, kao što i željezo može zamjenjivati jedan dio kroma u njegovim karbidima. Karbidi kroma oduzimaju osnovnoj masi dio ugljika i kroma i time utiču na temperature preobražaja. Dodatkom kroma smanjuje setopljivost ugljika u željezu te se sastav eutektika i eutektoida pomiče prema nižim sadržajima ugljika a njihove tačke topljenja prema višim temperaturama. Uslijed toga se u čeliku može pojavit i primarni cementit u eutektičnoj strukturi (*ledeburit*, v. slika 13). Legure s takvom strukturom računaju se u čelike (*ledeburitni čelici*) mada bi zbog ledeburitne strukture i sadržaja ugljika nekad i iznad 2,0% C, strogo uvezši, prema definiciji, već spadali u gvožde. Slika 27 prikazuje kako se dodatkom ugljika pomjeraju granične linije između područja različitih kromnih čelika.

Sl. 27. Dijagram strukture kromnih čelika

S porastom kroma se u dijagramu TT sve više proširuje prolaz ispred linije početka nastajanja perlita, što pogoduje nastajanju bainita; u ekstremnom slučaju može se ohladijanjem sa visokim temperature dobiti i austenitna struktura. Pri cementaciji čelika koji sadrži krom, ugljik se blizu površine veže s kromom u karbide, što povećava tvrdoću površinskog sloja.

Zbog svog povoljnog djelovanja na prokaljivost i pri cementaciji u količinama do 3% Cr, krom je uz mangan, s dodatkom nikla i drugih legirajućih elemenata ili bez njega, glavni legirajući element u nekim čelicima koji su namijenjeni poboljšanju ili cementaciji. Od takvih se čelika stoga prave npr. takođe kuglice i valjci za ležajeve, jer su tvrdi, tj. otporni protiv habanja, a uz to čvrsti i razmjerne žilavi. U nadeutekičnim (tzv. karbidnim) i ledeburitnim kromnim čelicima tvrdi karbidi koji se izlučuju u martenzitu povećavaju otpornost prema habanju. U čelicima otpornim prema vodiku pod pritiskom iskorištava se otpornost karbida kroma na temperaturama do $\sim 500^{\circ}\text{C}$; oni sadrže obično 3...6, ponekad do 12% Cr, često uz dodatak molibdena, vanadijuma i volframa. Dodaci ujedno povisuju čvrstoću na povisenoj temperaturi. Čelici koji zadržavaju čvrstoću i na visokoj temperaturi i istovremeno su otporni prema plinovima koji djeluju oksidativno i sadrže sumporne spojeve sadrže 9 odn. 12% Cr uz dodatak Mo, odn. Mo, V, W.

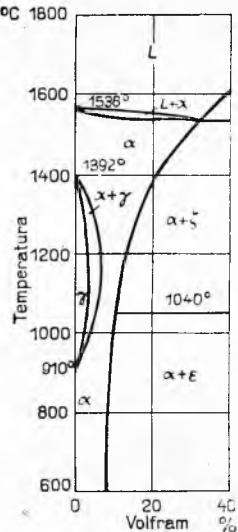
Kromni čelici sa većim sadržajem kroma imaju veliko praktično značenje kao čelici otporni protiv oksidacije na visokim temperaturama (stvaranja kovarine) i naročito kao čelici koji ne rđaju i čelici otporni prema kiselinama. Na slici 27 vidi se da pri povećanju sadržaja kroma struktura kromnih čelika prelazi iz austenitne u poliferitnu pa u feritnu. Shodno tome otpornost prema oksidaciji raste kontinuirano s porastom sadržaja kroma, te postoje čelici više ili manje otporni prema oksidaciji koji sadrže od ispod 12% pa do 25% kroma (ev. uz dodatak Si i Al). Za otpornost



Sl. 28 Dijagram strukture krom-nikalnih čelika

prema koroziji rastvorima (prema rđanju, prema kiselinama itd.) potrebno je da struktura bude homogena, dakle bilo feritna bilo austenitna. Prema tome kiselino otporni čelici sa samim kromom (neaustenitni) postaju dovoljno postojani u kiselim rastvorima tek kad im je sadržaj kroma iznad 12%, uz nizak sadržaj ugljika. S povišenjem sadržaja ugljika smanjuje se postojanost jer se uslijed stvaranja karbida smanjuje sadržaj kroma u osnovnoj masi. U tom slučaju treba ili spriječiti postanak karbida naglim ohlidanjem s visokim temperature ili povisiti sadržaj kroma. Drugi način da se postigne otpornost prema oksidaciji i koroziji jest da se dodatkom mangana ili nikla (elemenata koji šire područje austenita i snizuju temperaturu stvaranja martenzita) proizvedu austenitni čelici. Sl. 28 (po Maureru) prikazuje kako granice između područja različitih struktura u krom-nikalnim čelicima zavise od procenta legirajućih elemenata. Taj se dijagram odnosi na čelik sa $\sim 0,2\%$ C i razmjerno brzo hladjenje sa temperature od $\sim 1000^\circ\text{C}$. Taj dijagram pokazuje, npr., da se prvi uspjeli nerdajući čelik, poznati Krupov V2A sa 18% Cr i 8% Ni, nalazi na samim granicama austenitnog područja. Linije Maurerova dijagrama nešto se pomjeraju ako se mijenjaju predvjeti ili dodaju i drugi legirajući elementi. Za kiselinstalne čelice dolazi u obzir naročito molibden (Krupov čelik V4A). Nikal se može zamijeniti djelomično manganom (v. str. 54) ili manganom i dušikom (v. str. 55). Za stolni pribor upotrebljava se mnogo austenitni čelik sa 12% Mn i 18% Cr.

Željezo-volfram (slika 29). γ -Područje je u dijagramu Fe-W sasvim zatvoreno sa maksimalnim sadržajem 6,6% W. U legurama sa $> 8\%$ W postojan je u ravnotežnom stanju intermetalni spoj Fe_3W , pa se stoga te legure mogu otvrdnjavati putem izlučivanja tog spoja. Glavno djelovanje volframa u čelicima osniva se na stvaranju odvojenog karbida WC i miješanog karbida $(\text{WF}_6)_\text{C}$, koji uzrokuju povišenje čvrstoće u toplojem stanju, otpornost prema habanju i sposobnost rezanja. Dodatak volframa čelicima u prisutnosti C smanjuje rastvorljivost ugljika u austenitu i pomjera sastav eutektika i eutektoide prema nižim procentima ugljika, a neznatno povisuje temperaturu A_3 i A_1 . S obzirom na sadržaj ugljika volframni čelici dijele se na podeutektoidne, nadeutektoidne i ledeburitne prema slici 30. Volfram sužava perlito područje u dijagramima TT i pogoduje time formiranju bainitne strukture, a na temperaturu početka stvaranja martenzita praktično ne utiče, te se i velikim brzinama hladjenja ne postiže potpuno austenitna struktura. Prokaljivost se može povećati dodatkom kroma. Karbidi volframa stabilni su na normalnim temperatu-



Sl. 29. Dijagram stanja željezo-volfram

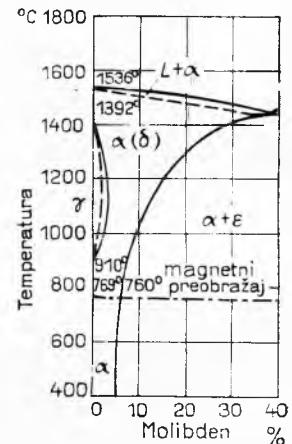
ugljika volframni čelici dijele se na podeutektoidne, nadeutektoidne i ledeburitne prema slici 30. Volfram sužava perlito područje u dijagramima TT i pogoduje time formiranju bainitne strukture, a na temperaturu početka stvaranja martenzita praktično ne utiče, te se i velikim brzinama hladjenja ne postiže potpuno austenitna struktura. Prokaljivost se može povećati dodatkom kroma. Karbidi volframa stabilni su na normalnim temperatu-

rama kaljenja pa je potrebno temperaturu austenitizacije povezati na preko 1100°C da bi se karbid rastvorio u austenitu. Budući da i na takvim temperaturama austenitizacije nešto karbida volframa još ostaje nerastvoren, oni sprečavaju povećanje zrna te su čelici s volframatom neosjetljivi prema pregrijavanju. Karbidi u zakaljenom volframnom čeliku i mali udio zaostalog austenita uslovjavaju veliku tvrdoću takvog čelika: čelik sa 1% C i 15...20% W ima tvrdoću HR C = 72 kp/mm²; to je najveća tvrdoća čelika koja se može postići kaljenjem. Pri napuštanju nakon kaljenja karbidi se izlučuju na višim temperaturama, što volframnim čelicima osigurava veliku tvrdoću na tim temperaturama. Prvenstveno zbog toga volfram je najvažniji legirajući element brzoreznog čelika. Ranije se najviše upotrebljavao brzorezni čelik sa 18% W, ali danas postoje legure u kojima je volfram zamijenjen u velikoj mjeri manjim količinama drugih elemenata koji tvore karbide. Takav jedan niskolegirani brzorezni čelik ima npr. 1,1% C, 4,2% Cr i prosječno po 2,5% W, Mo i V. Velika tvrdoća karbida volframa iskorištava se u alatnim čelicima izloženim jakom habanju. U takvim slučajevima čelik se kali sa normalnih temperatura kaljenja (nešto iznad Ac_3), tako da ostaju nerastvorenii krupni kristali karbida, koji su otporniji prema habanju nego sitniji kristali.

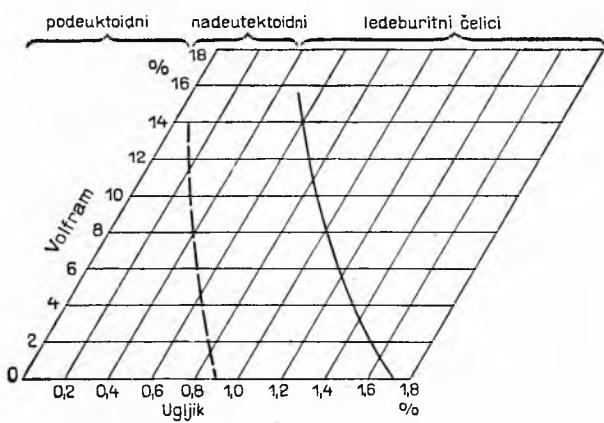
Željezo-molibden (slika 31). Binarni dijagram Fe-Mo vrlo je sličan dijagramu Fe-W; maksimalni sadržaj molibdena u γ -fazi iznosi $\sim 0,5\%$. Poput volframa, i molibden tvori sa željezom intermetalni spoj čija rastvorljivost u željezu raste s povišenjem temperature (Fe_3Mo_2), pa se i čelici sa većim sadržajem molibdena mogu otvrdnjavati izlučivanjem. Molibden tvori stabilni karbid Mo_2C i osim toga može zamijeniti jedan dio željeza u cementitu. Za razliku od volframa, molibden znatno snižava kritičnu brzinu hladjenja i smanjuje brzinu difuzije ugljika kako snižuje temperaturu A_1 te tako pogoduje povećanju prokaljivosti; u konstrukcionim čelicima pomjera perlito područje u dijagramima TT nadesno, a na bainitno područje ne utiče, stoga poput volframa pogoduje stvaranju bainitne strukture. Kao volframni čelici i iz istih razloga, molibdenski čelici nisu osjetljivi prema pregrijavanju na potrebnim visokim temperaturama austenitizacije. Kao i čelici sa kromom i volframatom, uslijed sporog rastvaranja karbida, molibdenski čelici imaju stabilnu strukturu pri napuštanju, pa se upotrebljavaju kao alatni čelici za rad na visokim temperaturama. I u drugim alatnim čelicima nalazi se često molibden, jer on povisuje prokaljivost, stabilnost pri napuštanju, čvrstoću u toplojem stanju, sposobnost rezanja i otpornost prema habanju. Često u tim čelicima zamjenjuje volfram. U konstrukcionim čelicima čvrstim na visokim temperaturama molibden je glavni legirajući element; ti čelici većinom sadrže osim njega još krom, volfram i vanadijum. U nerdajućim kromnim i krom-nikalnim čelicima dodatak molibdena povisuje otpornost prema koroziji, napose koroziji sumporastom kiselinom, fosforom i razrijedenom dušičnom kiselinom.

Željezo-vanadijum. Dijagram stanja Fe-V vrlo je sličan dijagramu Fe-Cr, zatvoreno γ -područje seže u odsutnosti ugljika do 1,1% V, ugljik to područje proširuje. Vanadijum ne ulazi u cementit ali njegov karbid V_4C_3 nastupa odvojeno u tehničkim čelicima ako je sadržaj vanadijuma $> 0,1\%$. Ako je sadržaj vanadijuma $< 0,1\%$, V je otopljen u željezu i na običnoj temperaturi. Karbid vanadijuma povećava stabilnost strukture konstrukcionih čelika pri napuštanju i njihovu čvrstoću u toplojem stanju, otpornost prema habanju alatnih čelika i njihovu sposobnost rezanja na visokim temperaturama.

Kao i drugi čelici s legirajućim elementima koji tvore karbide, vanadijumni čelici moraju se kaliti s visokih temperatura,

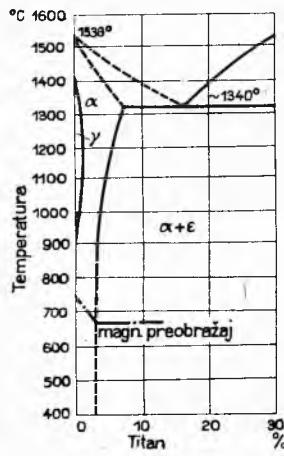


Sl. 31. Dijagram stanja željezo-molibden



Sl. 30. Dijagram strukture volframskih čelika

na kojima zbog sadržaja karbida nisu osjetljivi prema pregrijavanju; time se smanjuje kritična brzina kaljenja. Na temperaturu početka stvaranja martenzita vanadijum ne utiče. Budući da vanadijum stvarajući karbide oduzima ugljik osnovnoj masi, kaljivi čelici s većim sadržajem vanadijuma moraju sadržati i više ugljika. Brzoreznim čelicima bogatim ugljikom dodaje se do 5% V, redovito uz druge legirajuće elemente, u konstrukcionim čelicima sa više legirajućih elemenata sadržaj vanadijuma je redovito ispod 0,5%. Vanadijum tvori i nitride, što je povoljno u čelicima za nitriranje; nitridi vanadijuma povisuju čvrstoću čelika u toploem stanju i sprečavaju rast kristala, čime se povećava neosjetljivost prema pregrijavanju i poboljšava zavarljivost. Otpornost prema stvaranju kovarine većim se dodacima vanadijuma smanjuje.

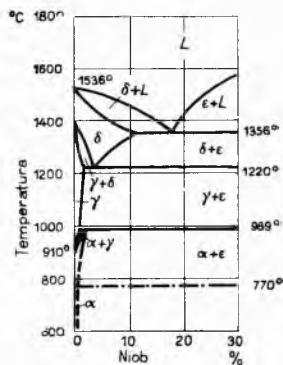


Sl. 32. Dijagram stanja željezo-titan

osjetljivost na pregrijavanje, kritičnu brzinu hlađenja, važi ono što je rečeno za druge legirajuće elemente koji tvore odvojene karbide. Rastvorljivost titana u α -željezu na običnoj temperaturi iznosi ispod 0,5%, s povišenjem temperature raste, pa se legure titana i željeza mogu otvrđnjavati izlučivanjem titana. Titan se u novije vrijeme sve više upotrebljava u industriji čelika, naročito kao dodatak nerđajućim čelicima jer vežući ugljik u stabilan karbid sprečava međukristalnu koroziju, i u legurama čvrstim na povišenim temperaturama. Pri tom su se pokazali korisnima dodaci dušika i kisika, u vezi s time što karbid, nitrid i oksid titana (TiO_2) tvore među sobom miješane kristale.

idizaciju cementita i time pomaže održavanju tvrde strukture na temperaturi napuštanja.

Sl. 34. Dijagram stanja željezo-niob



Sl. 34. Dijagram stanja željezo-niob

Niob-tantal-željezo (v. sl. 34), *berilijum-željezo* i *cirkonijum-željezo*. Niob i tantal dolaze redovito zajedno u ferolegurama, a prema tome i u čeliku. Zbog njihove skupoće dodaju se čeliku rijetko i uvijek u vrlo malim količinama. Za njihovo djelovanje u čeliku vrijedi uglavnom sve ono što je rečeno za titan. Dijagram Fe-Be sličan je dijagramu Fe-Ti pa je i djelovanje berilija u čelicima slično djelovanju titana. I cirkonijum, koji je u svakom pogledu sličan titanu, djeluje u čelicima slično kao on.

(V. i članke o pojedinim legirajućim elementima.)

A. Sarajlić

SAVREMENI PROCESI PROIZVODNJE ČELIKA

Masovni čelik proizvodi se u velikim količinama i u kvalitetu za relativno široku primjenu, a specijalni se čelici proizvode u relativno malim količinama i u specijalnom kvalitetu za vrlo usku, specifičnu primjenu. Vrsta čelika, osnovna sirovina za njegovu proizvodnju i proces kojim se čelik proizvodi tijesno su uzajamno uslovljeni. Na široj skali kombinacija ove povezanosti treba razlikovati dva ekstrema. Jedan u kome je osnovna sirovina tečno gvožđe, proces konverzije pneumatski, a proizvedeni čelik masovni, i drugi u kome je osnovna sirovina biran raskov („staro željezo“), proces proizvodnje elektroindukcijski, a proizvedeni čelik specijalni. Raspon između ovih ekstrema, kako u pogledu kvaliteta tako i u pogledu kapacitetnih mogućnosti, elastično popunjava prema pneumatskom ekstremu Siemens-Martinov (SM) proces, a prema elektroindukcijskom elektrolučni proces. Pri tome se najčešćom elastičnošću odlikuje SM-proces, jer može upotrebljavati kao isključivu sirovинu ili bijelo gvožđe (poput pneumatskih procesa), ili raskov (poput elektroindukcijskih procesa), ili proizvoljnu kombinaciju bijelog gvožđa i raskova, i to bilo sa potpuno tečnim uloškom (poput pneumatskih procesa), bilo sa potpuno čvrstim uloškom (poput elektroindukcijskih procesa), bilo sa uloškom dijelom tečnim a dijelom čvrstim, u proizvoljnoj razmjeri ovih dijelova.

Proces proizvodnje čelika može biti kiseo ili bazičan. Razlikovanje kiselog i bazičnog procesa osniva se na hemijskom karakteru.

teru obloge prostora u kojem se proizvodi čelik. Ako je ta obloga bazična (magnezit, dolomit), može se istopljeni uložak otfosforavati i odsumporavati, ako je kisela (ljepki pjesak, tj. pjesak sa 90% SiO₂, ostatak glina), isključena je svaka mogućnost otfosforavanja i odsumporavanja. U bazičnom procesu mora se raditi sa bazičnom, u kiselom procesu sa kiselim troskom.

Osnovne sirovine za proizvodnju čelika. Osnovne su sirovine za proizvodnju čelika bijelo gvožđe, raskov (staro željezo) i (metalni) dodaci.

Od gvožđa koja se proizvode u visokoj peći (rjeđe u elektroreduksijskoj peći) za proizvodnju čelika dolaze u obzir Bessemerovo, Thomasovo i Martinovo bijelo gvožđe. Njihov sastav dat je u tablici 1. Za osnovnu orientaciju može se uočiti da Bessemerovo bijelo gvožđe karakteriše relativno visok sadržaj silicijuma, Thomasovo visok sadržaj fosfora, a Martinovo visok sadržaj mangana. Za potpunije diferenciranje ovih vrsta bijelog gvožđa mora se međutim imati u vidu nizak sadržaj sumpora i fosfora Bessemerovog, nizak sadržaj silicijuma Thomasovog, relativno nizak sadržaj silicijuma, fosfora i sumpora Martinovog gvožđa.

Tablica 1
GVOŽĐA ZA PROIZVODNJU ČELIKA

Gvožđe	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Bessemerovo	4,0...4,5	1,1...1,5	0,4...0,7	0,09	0,03
Thomasovo, sa Mn	3,2...3,5	0,3...0,4	1,2...1,5	1,8...2,2	0,05...0,12
Thomasovo, sa malim sadržajem Mn	3,2...3,6	0,3...0,4	0,5...0,8	1,8...2,2	0,05...0,12
Martinovo, sa malim sadržajem Mn	3...4	do 1	2...3	0,08...0,12	do 0,04
Martinovo, sa srednjim sadržajem Mn	3...4	do 1	3...4	0,08...0,12	do 0,04
Martinovo, sa visokim sadržajem Mn	3...4	do 1	4...6	0,08...0,12	do 0,04

Raskov čine nusproizvodi izrade i ishabani, slomljeni ili odbačeni dijelovi koji sadrže gvožđe ili čelik. Ova osnovna sirovina može prema izvoru iz koga potiče biti bilo sopstveni raskov (neprometni, a u proizvodnji i preradi čelika neizbjegni proizvodi) bilo kupovni. Kupovni raskov može biti rastureni raskov ili promptni industrijski raskov. Prvi se mora sakupiti, a drugi proizvode potrošači čelika izrađujući vlastite proizvode. Raskov se klasificuje po veličini komada i po hemijskom sastavu. Komadi prekrupni za ulaz u procesni prostor moraju se smanjiti (autogenim rezanjem, lomljenjem), a presitni se moraju komprimovati u blokove (presovanjem). Pod pretpostavkom da je raskov kako treba razvrstan u pogledu hemijskog sastava, osnovni je cilj njegove pripreme da se postigne optimalna težina raskova koja se odjednom može uložnim sudom i uredajem ubaciti u peć.

Proizvodnja čelika uključuje i dodavanje različitih hemijskih elemenata istopljenom metalu da bi se postigli određeni željeni efekti. U takve efekte spadaju: dezoksidacija tečnog metala do željenog stepena, regulisanje veličine zrna u čeliku, poboljšanje mehaničkih i fizičkih svojstava i korozionske otpornosti čelika, predisponiranje čelika za termičku obradu itd. Svaki materijal koji se dodaje istopljenom čeliku radi uticanja na njegov sastav ili njegova svojstva zove se *dodatak*. Posebnu grupu dodataka čine ferolegure (fero) zbog visokog procenta željeza u njima kad se proizvode u visokoj peći: feroaluminijum, ferobor, ferocer, ferocirkon, ferofosfor, ferokrom, feromangan, feromolibden, feronikal, feroniob, ferosilicijum, ferontantal, ferotitan, ferovanadijum, ferovolfram. One služe za dezoksidaciju (FeAl, FeB, FeCe, FeMn, FeSi, FeTi, FeV, FeZr) i/ili unošenje legirajućih elemenata u čelik. Elektroreduksijskim putem mogu se proizvesti legirajući dodaci za čelik koji sadrže vrlo malo željeza. Dodaci se unose u čelik bilo dok je on još u peći u stadiju uloška, bilo u istopljenu kupku pri kraju procesa, bilo u kazan ili u kokilu. Kada će se i gdje materijal dodavati zavisi od djelovanja dodatka na temperaturu istopljenog metala, od brzine kojom se dodatak rastvara u metalu, od njegove oksidativnosti, od karaktera formiranja i eliminisanja reakcijskih proizvoda koji nastaju od djelovanja dodatka na metal. Dodaci određeni za peć moraju imati veličinu komada ~ 120 mm kako bi se mogli lako probiti kroz trosku u metal, dodaci, pak, koji su određeni za kazan ne treba

da budu veći od 25 mm, da bi se mogli brzo rastvoriti. Najvažnija ferolegura u proizvodnji čelika je feromangan.

Osnovne hemijske reakcije procesa proizvodnje čelika.

Princip proizvodnje čelika svodi se na slog metalurških operacija kojima se iz određene količine osnovnih sirovina određenog sastava, primjenom dovoljno visoke temperature, gasne atmosfere i tečne troske, postiže takva evolucija sistema metal-atmosfera-troska-obloga peći da se na kraju određenog vremena postigne, uz potrebne dodatke i u okviru dozvoljene tolerancije sadržaja pojedinih elemenata, čelik zadatog sastava. Ako se startna analiza istopljenog uloška, na početku procesa, i ciljna analiza metala, na kraju procesa, napišu jedna ispod druge, npr.:

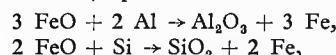
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Start Ciliј	3,70 0,11	1,25 trag	0,4 0,44	0,2 0,03	0,6 0,054

vidi se da se procesom proizvodnje ovog čelika moraju sadržati skoro svih elemenata (C, Si, P, S) svesti na relativno male vrijednosti. U SM-peći ovaj će cilj biti postignut za različite elemente na različit način. C, Si i Mn izgaraju automatski — oksidišu se kisikom iz gasne smjese vazduha i goriva koja se spaljuje u atmosferi iznad kupke i obezbjeđuje potrebnu visoku temperaturu procesa. Udaljavanje fosfora i sumpora zahtijeva posebne mjeru. Prije svega, otfosforavanje i odsumporavanje moguće je samo u bazičnoj peći (peći sa bazičnom vatrostalnom oblogom), koja, kao takva, dopušta rad sa bazičnom troskom. Otfosforavanje i odsumporavanje se onda vrši pomoću kreča. Ipak, ove dvije operacije zahtijevaju različite atmosfere: otfosforavanje — što oksidativniju, odsumporavanje — što reduktivniju. (Zbog toga je otfosforovanje najefikasnije u bazičnoj SM-peći, a odsumporavanje u bazičnoj elektrolučnoj peći.) Za vrijeme oksidacije elemenata C, Si i Mn, ugljik prelazi u CO i kao gas izlazi iz taline. Istovremeno sa CO iz taline izlaze i vrlo nepoželjni elementi H i N. U upotrijebljrenom primjeru izgaranje mangana nije poželjno jer ga u čeliku treba da bude najmanje toliko koliko i u istopljenom ulošku. Ali izgaranje mangana u SM-procesu ne može se sprječiti i gubitak tog elementa mora se nadoknaditi odgovarajućim dodatkom feromangana na kraju procesa.

U periodu oksidacije najvažniju ulogu igra FeO, koji posreduje u prenošenju kisika iz gasne atmosfere u kupku. Kad se dostigne željeni stepen oksidacije ugljika i silicijuma, kupka je već u izvjesnoj mjeri preoksidisana, tako da se višak za kvalitet čelika krajnje štetnog FeO mora eliminisati postupkom dezoksidacije. Nedezoksidisan čelik bi se još pri lijevanju u kokile u njima propinjao (rastao), a pod valjcima ili pod čekićem raspadao. Čelik se dezoksidira u dva stepena. U prvom stepenu FeO se redukuje feromanganom po shemi:



Reakcijski produkt MnO, praktično nerastvorljiv u čeliku, isplivava iz čelika, a ukoliko i zaostane u čeliku, manje je škodljiv od FeO, koji je u čeliku rastvorljiv; MnO lakše koaguliše i time manje raspinje metalni sklop nego FeO, koji u procesu kristalizacije čelika trakasto zaliježe između njegovih zrna. Proces prikazan gornjom jednadžbom ne ide do kraja, uvijek u čeliku ostaje mala količina tzv. rezidualnog FeO. Od toga da li se eliminise i rezidualni FeO ili ne, tj. da li se izvrši i dezoksidacija u drugom stepenu ili ne, zavisi da li će odliveni čelik biti umiren ili neumiren. Ako se eliminise rezidualni FeO, tj. ako se metal dezoksidira jačim dezoksidantima, kao što je Al i Si (u obliku ferosilicijuma), rezidualni se FeO redukuje po shemi:



a novoformirani će oksidi (Al₂O₃ ili SiO₂) manje ili više isplivati kao troska.

Bessemerov proces. Prvi pneumatski proces i uopšte prvi proces dobijanja masovnog čelika u tečnom stanju bio je Bessemerov proces u kiselom konverteru. Oksidacioni gas, zvan »vjetar« (vazduh, kisik ili smjesa jednog i drugog) uduvava se u rastopljeno gvožđe pod pritiskom kroz perforirani pod konvertera.

(Konverteri u koje se oksidacioni gas ubrizgava bočno zadržali su se još samo u livnicama čelika, i to kao kiseli konverteri sa bočnim ubrizgavanjem iznad površine kupke.)

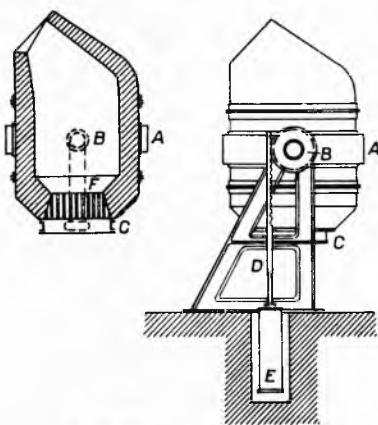
Danas u Evropi uslove za primjenu Bessemerov procesa imaju još samo Engleska i Švedska. Čak i u USA, gdje bi rude Mesabi Range mogle tvoriti široku osnovu za ovaj proces, on više nije glavni među postupcima proizvodnje masovnog čelika. To njegovo mjesto zauzeo je i tamo SM-proces iz različitih, dijelom metalurških dijelom ekonomskih razloga. Nekad upotrebljavan za proizvodnju velikih količina željezničkih tračnica u USA, danas se kiseli Bessemerov čelik tamo upotrebljava za proizvodnju svarenih cijevi, bešavnih cijevi, plosnatog valjanog čelika, žice i čeličnog liva, a preko polovine Bessemerovim procesom proizvedenog sirovog čelika uključuje se u duplex-proces, tj. u integraciju sa SM-procesom.

Thomasov proces. Thomasov proces razlikuje se od Bessemerovog procesa po tome što Thomasov konverter ima bazičnu vatrostalnu oblogu i što se upotrebljava krečnjak ili kreč kao troškotvorni materijal. Posljedice ovih razlika vrlo su značajne, jer Thomasov proces omogućava izvjesno otfosforavanje i odsumporavanje metala u konverteru, čime je revolucionarno proširena sirovinska baza za proizvodnju masovnog čelika. U pogledu otfosforavanja i odsumporavanja, Thomasov proces sličan je SM-procesu i Thomasov je čelik po sastavu i osobinama bliži SM-čeliku nego Bessemerovom. Ali on ima u odnosu na SM-proces određene nedostatke. Vazduh koji prostruјava kroz tečni metalni uložak u Thomasovom konverteru utiskuje Thomasovom čeliku općenito veći sadržaj kisika, a u svakom slučaju veći sadržaj azota, nego što ih može imati SM-čelik. Zbog veće čvrstoće, a manje duktelnosti i manje žilavosti, Thomasov čelik ima uže područje primjene nego SM-čelik.

Po strukturi opreme Thomasova čeličana uvelike je slična Bessemerovoj. Ona obično ima 6 konvertera po 25 t, sa kapacitetom proizvodnje 3000 t dnevno.

Konverter (sl. 35) cilindričan je sud čiji je plašt od zakovane ili zavarene čelične konstrukcije, oslonjen preko obruča A na dva horizontalna rukavca B. Jedan rukavac je šuplj i služi kao dovod vjetra do lučne cijevi kojom se ovaj uvodi u duvni prostor C pod podom konvertera. Drugi rukavac kombinovan je sa zupčanom motkom D i hidrauličkim mehanizmom E za nagnjanje konvertera. F je šuplje dno konvertera kroz koje se vjetar uvodi u kupku.

Dok nije bio izumljen mikser, konverteri su se snabdijevali tečnim gvožđem iz kupolnih peći. U njima je pretapano gvožđe



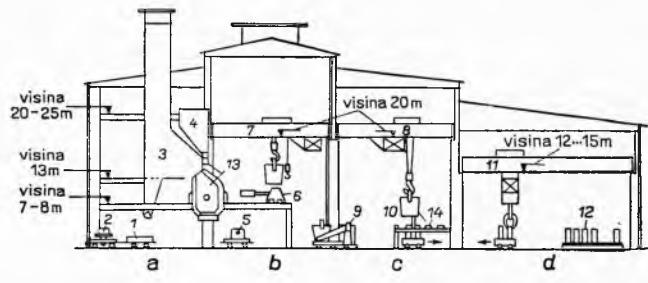
Sl. 35. Thomasov konverter

dobiveno u visokim pećima, čiji se ritam izliva nije mogao sprenguti sa ritmom potrošnje metala u konverterima. Problem ove sprege riješen je mikserom čija je osnovna svrha da pohranjuje tečno gvožđe iz visokih peći do časa njegove upotrebe u konverteru. Mikser je velik, cilindričan sud, horizontalno montiran na dva sloga vodišta i valjaka, postavljenih na snažne betonske temelje. Potrebna rotacija miksera postiže se sistemom električkog motora, reduktora, puža i motke spojene sa dnem miksera. Plašt miksera sastoji se od spojenih čeličnih ploča koje čine okvir i

mehanički oslonac za oblogu od vatrostalnih opeka, debelu preko pola metra. Obloga se podvrgava djelomičnom remontu svake godine, a generalnom svake tri do četiri godine. Mikser ima na vrhu jedan otvor kroz koji se puni naginjanjem kazana koji sadrži tečno gvožđe iz visoke peći, a na prednjoj strani drugi otvor sa žlijebom preko kojeg se naginjanjem miksera izuzimaju u posebni kazan konverteru potrebne količine tečnog metala. Funkcija miksera je trostruka: on zadržava toplotu u tečnom metalu (uz mogućnost dodatnog loženja preko gasnih ili uljnih gorionika), u njemu se homogenizuje sastav tečnog metala i njime se puferski povezuje ritam rada visokih peći i konvertera.

Mikseri su obično obloženi bazično (magnezitnim opeckama), a »aktivni« mikseri sa sopstvenim zagrijavanjem omogućavaju i izvjesnu predrafinaciju tečnog gvožđa krećom prije konvertovanja.

Kapacitet konverterâ kreće se od 25 do 60 tona. Njihova obloga je naboј smjese katrana i prženog dolomita. Za razliku od Bessemerovog konvertera, koji u podu ima posebne duvnice, pod Thomasovog konvertera perforiran je sa ~ 200 rupa prečnika



Sl. 36. Konverterska čeličana (poprečni presjek). a) Hala dimnjaka, b) konverterska hala, c) livna hala, d) ingotska i kokilna hala. 1) Kola za krš, 2) kola za postavljanje poda, 3) dimnjak, 4) bunker za kreč i dodatke, 5) kola i lonac za trosku, 6) pokretna uložna mašina za dodatke, 7) mosna dizalica s kazanom za gvožđe, 8) mosna dizalica za livenje, s kazanom 10 iznad livenog podesta 14, 9) kola za prenos livnih kazana iz konverterske u livnu halu, 11) mosna dizalica za stripovanje kokila, pretovar ingota i postavljanje kokila, 12) odložni podest za hlađenje kokila, 13) konverter

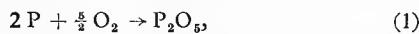
~ 12 mm, u koje su za vrijeme formiranja poda udjeveni drveni čepovi. Tokom šestodnevne termičke obrade u posebnim pećima, drveni čepovi se ugljenišu i na kraju izbuše. Vijek poda iznosi 40 topljenja, donjem dijelu obloge konvertera 200, gornjem oko 400 topljenja. Vertikalni presjek jedne Thomasove čeličane dat je na sl. 36.

Kao i u tehnicu Bessemerovog procesa, tako još više u tehnicu Thomasovog procesa činjeni su pokušaji da se različitim usavršavanjima što bitnije poboljša kvalitet čelika, posebno s obzirom na stepen njegove denitrifikacije. Zbog tih varijanti savremeni se Thomasov proces i ne može prikazati na jednoobrazan način, izuzev u osnovnim crtama.

Iz tečnog Thomasovog gvožđa u izvjesnoj se mjeri sodom eliminiše sumpor bilo između visoke peći i miksera bilo između miksera i konvertera, a formirana troska pažljivo se skine. Prije ulijevanja gvožđa u konverter, u horizontalnom položaju konvertera, žlijebom se zaspere paljeni kreč (150 kg na tonu tečnog gvožđa), konverter se zatim nešto dublje nagne i u njega se nalije tečno gvožđe. Zatim se uključi vjetar pod pritiskom nešto preko 2 at i konverter se ispravi. Momenat u kojem se dodaje raskov za regulisanje temperature zavisi od vrste raskova, kao što ukupno trajanje produvavanja topilac procjenjuje po prelomu uzorka uzetog iz taline. Ona je slična završnoj tački Bessemerova procesa, ali se zbog manjeg sadržaja silicijuma javlja relativno prije. Dopunsko produvavanje je relativno duže nego u Bessemerovom procesu, radi otfosforavanja, i traje 3 do 5 min u okviru 10 do 16 min ukupnog trajanja procesa. Po završenom produvavanju iz konvertera se najprije obazrivo izlije najveći dio troske, zatim se dodaje feromangan u predgrijanim komadima, rezidualna troska se zajazi krećom pri ušću konvertera i, najzad, čelik se izlije u kazan pod konverterom.

Dok u Bessemerovom procesu praktički ne dolazi do reakcija između troske i metala, ove reakcije upravo karakterišu Thomasov proces i svode se na otfosforavanje i na izvjesno odsumporavanje

metala. Eliminacija C, Si i Mn odvija se prema ranije iznesenim reakcijama. Reakcije otfosforavanja i odsumporavanja metala ostvaruju se pomoću kreča. P se najprije oksidiše u anhidrid fosforne kiseline:



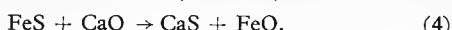
koji prelazi u trosku i u njoj reaguje sa krećom tvoreći kalcijum-fosfat:



Odsumporavanje se realizuje reakcijom prelaza FeS iz metala u trošku:

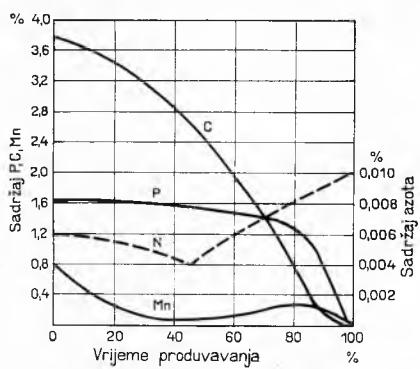


u kojoj reaguje sa krečom, formirajući kalcijum-sulfid:



Iako je za obje reakcije (2) i (4) potrebna dovoljna koncentracija kreća u troski, dosta suprotni su ostali uslovi za oftosforavanje s jedne i za odsumporavanje s druge strane. Za oftosforavanje je povoljna visoka koncentracija FeO u troski i kisika u metalu, za odsumporavanje, naprotiv, povoljna je samo niska koncentracija FeO u troski i kisika u metalu. Time se i objašnjava što je po pravilu odsumporavanje metala u Thomasovom konverteru samo djelomično, a intenzivnije je jedino u prisustvu troske sa visokim sadržajem kreća. Navedeni uslov za oftosforavanje pak objašnjava ujedno i zašto se glavnina fosfora eliminiše tek nakon što je eliminisan ugljik. Na visokim temperaturama potkraj prostrujavanja postoji mogućnost izvjesnog nepoželjnog povratka mangana, ali s njim skupa i fosfora, iz troske u metal. S jedne strane, zbog opasnosti povratka fosfora iz troske u metal, a s druge strane, radi ograničavanja sadržaja azota u čeliku, kontrola temperature procesa, važna u Bessemerovom procesu, još je važnija u Thomasovom.

Dok se u Bessemervom procesu izgaranje silicijuma javlja kao izvor potrebne toplotne energije, u Thomasovom procesu, gdje je zbog ulaganja kreča pored tečnog metala potrebna još i dopunska toplotna energija, izgaranje silicijuma ne može biti



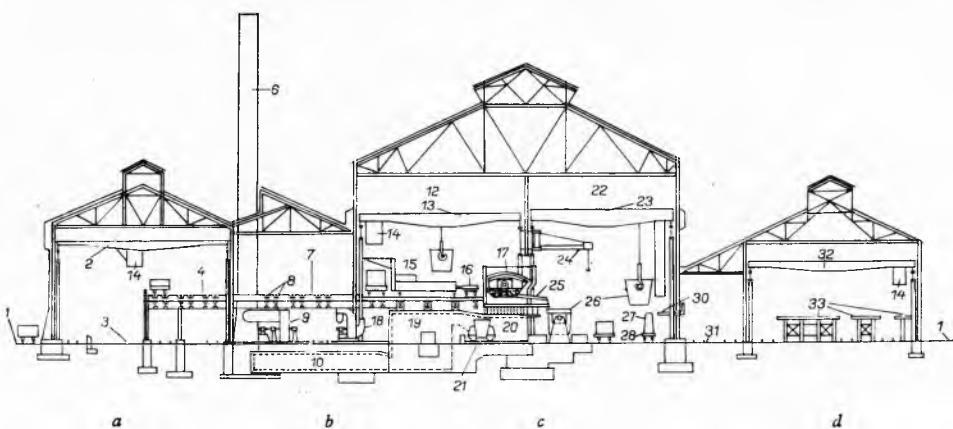
Sl. 37. Sadržaj C, P, Mn i N u čeliku kao funkcija vremena u toku Thomasovog procesa

taj izvor, jer bi za prevođenje kremene kiseline u trosku bilo potrebno mnogo kreća, to više što bi sadržaj silicijuma u gvoždu bio viši. Srćom, ulogu glavnog davaoca toplotne energije u Thomasovom procesu ima fosfor; stoga sadržaj Si u gvoždu mora biti nizak, od 0,2 do 0,4%. Grafički prikaz sadržaja C, P, Mn i N kao funkcije vremena u toku Thomasovog procesa dat je na sl. 37.

Zbog povoljnog odnosa fosforne kiseline i kreča, troska Thomasovog procesa je izvrsno dubrivo i veoma koristan nusproizvod ovog procesa proizvodnje čelika.

Bitan cilj usavršavanja Thomasovog procesa bilo je postizanje što nižih sadržaja azota u Thomasovom čeliku, bar nadomak granica sadržaja ovog elementa u SM-čeliku (0,003 do 0,005%). Niskoazotni Thomasov čelik upotrebljava se za proizvodnju žice, brodskih limova, čelika za duboko izvlačenje, visokougljičnih (visokočvrstih) čelika i različitih vrsta umirenih čelika.

Bazični SM-proces. Dispozicija čeličane bazičnog SM-procesa može biti riješena jednostavnije ili složenije, ali uvjek sadrži centralnu dvobrodnu halu peći, sa uložnim poljem i pećima u jednom brodu i livnim poljem u drugom brodu. Same peći (najviše 12 peći u jednoj čeličaniji) postrojene su u liniji svoje uzdužne osi na granici oba broda, ali tako da skoro sva širina peći pada u brod uložne strane. Najrazrađenije dispozicije SM-čeličana potiču iz USA (sl. 38). Paralelno s pećnom halom ova



Sl. 38. Presjek moderne SM-čeličane. *a* Uložni dvor, *b* aneks, *c* pećna hala, *d* kokilni dvor. *1* Nivo uložnog i kokilnog dvora, *2* mosna dizalica uložnog dvora, *3* skladište sirovine, *4* punjenje i raspoređivanje uložnih vagoneta, *6* dimnjak, *7* rezervna natovarenija uložnih vagoneta, *8* kolosijeci, *9* usisni ventilator, *10* dimni kanal, *12* uložni brod, *13* mosna dizalica s kazanom za tečno gvožđe, *14* kakanja dizalice, *15* uložna mašina, *16* uložno korito, *17* peć, *18* pritisni ventilator, *19* regeneratorska komora, *20* troskovnik, *22* livni brod, *23* mosna dizalica za livne kazane *26*, *24* dizalica za livni žlijeb *25*, *27* kokila, *28* kolica za kokilu, *30* livni podest, *31* kolosijeci za transport ingota, *32* mosna dizalica kokilnog dvora, *33* radni podest

dispozicija ima na strani uložnog broda halu uložnog dvora i na strani livnog broda halu kokilnog dvora. Iznad radnog nivoa uložnog broda saobraćaju uložne mosne dizalice sa pomoćnom dizalicom sile 100-150 Mp. Na jednom kraju uložnog broda nalaze se mikseri za gvožđe (obično dva miksera po 800 t). U livnom brodu operacije se odvijaju uglavnom na dvornom nivou izuzev nivoa uske livne platforme na granici između livnog broda i kokilne hale. Livna hala ima livne mosne dizalice, a livna strana svake peći, konzolne. U livnom brodu instalisana je i priprema kazana i odlivnog materijala. Pomoćni su prostori u ovoj dispoziciji čeličane troskovni dvor (drobljenje SM-troske i rekuperacija metalra zahvaćenog u troski), raskovni dvor (rezanje i lomljenje raskova) i hala za izbijanje ingota iz kokila.

U konstrukciji SM-peći razlike između kisele i bazične SM-peći svode se uglavnom samo na razlike u vatrostalnom materijalu ognjišta peći. U svemu ostalom one su veoma slične. Sama SM-peć je radijacijsko-plamena i reverzivno-regenerativna ognjišna peć. Plamen zagrijava ne samo uložak nego i svod peći koji akumulisanu toplotu isijava na uložak. Gorivo i vazduh s jedne i dimni gas od sagorijevanja nad ognjištem s druge strane, u uzastopnim periodima vremena mijenjaju smjer strujanja, tako da u jednom periodu jedan par komora-regeneratora dovodi vazduh i gorivo na jednu čeonu stranu peći a drugi par prihvata i izvodi dimne gasove na drugu čeonu stranu peći, a u drugom periodu, poslije obrta smjera gasova, reverziranja, jedan i drugi par komora mijenjaju te uloge.

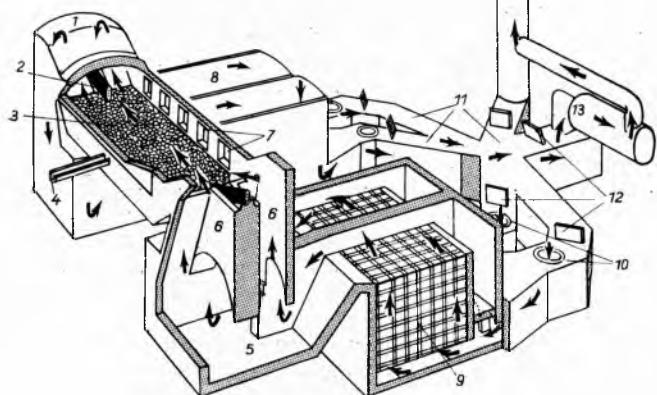
Dok se sama peć nalazi na gornjem nivou uložnog broda pećne hale, svi su dijelovi koji je povezuju s dimnjakom na dvornom nivou i jednim dijelom ispod tog nivoa. Od granice prema livnom brodu pa širinom uložnog broda sve do kraja aneksa između uložnog broda i uložnog dvora, gdje je smješten krajnji organ peći, dimnjak, nalaze se ispod nivoa na kojem je tijelo peći, redom:

troskovnici (pod samom peći), mosni kanal između troskovnika i komora, regeneratorske komore, horizontalni kanali, zasuni i ventili, ev. kotao utilizator i, najzad, dimnjak. Na svakoj čeonoj strani SM-peći nalaze se tzv. glave peći koje su preko kutnih uvodnika (poslije obrta smjera postaju izvodnici) u horizontalnom smjeru spojene sa ognjištem peći, a preko vertikalnih kanala sa troskovnikom i regeneratorskim komorama. Prikљučci hladnog goriva i vazduha nalaze se u polju kanala između komora i dimnjaka. Uloga je regeneratorskih komora da svojom vatrostalnom mrežom oduzmu dimnim gasovima najveći dio toploće kad struje kroz doći par komora i da tu toplotu predaju hladnom gorivu, odnosno vazduhu, kad kasnije kroz isti par komora strui gorivo, odnosno vazduh. Postizanje visokih temperatura u peći, nezavisno od sastava uloška, temeljni je faktor SM-procesa u odnosu na klasične pneumatske procese (Bessemerov i Thomasov).

Tijelo peći ima pod, prednji i zadnji zid i svod koji jednom prelomnicom prelazi u svod glave na svakom kraju peći (sl. 39). Tijelo peći ima oblik paralelepipeda. Ljuska peći izgrađena je od vatrostalnih opeka. U njenoj čeličnoj bazi ukotvljene su čelične spone koje opisuju cijelu peć, stježu je i pružaju oslonac vatrostalnoj ljuski izloženoj termičkoj ekspanziji uslijed visokih temperaturi ognjišta. Izrada ognjišta, tj. poda i bokova njegovog korita, spada u najdelikatnije radove pri gradnji peći. Pod bazičnog ognjišta leži na sloju kromitnih opeka, ovaj na betonu, a beton, preko izolacijskog sloja, na čeličnoj ploči položenoj na I-profile.

Postoje tri metode izrade vatrostalnog bazičnog poda: a) uvaruje se sloj po sloj namrtvo prženog magnezita sa 8–20% mljevene bazične SM-troske, a na kraju se pod glazira samom troskom; b) kompozitni pod: nabija se sloj magnezita, pa sloj kromitne smjese, i najzad, uvaruje se sloj magnezita po metodi pod a), i c) nabija se čitav pod slojem magnezita koji se onda suši, progrijava i glazira. Temeljni slojevi poda izdrže 3 do 6 hiljada topljenja, odnosno do 5 godina.

Isto tako je delikatno i formiranje ispusta na koji se priključuje kosina poda. U otvor ostavljen u ravni simetrije peći a pri dnu njenog zadnjeg zida postavlja se čelična cijev, a zazor između nje i bazičnih opeka nabije se magnezitom, ili magnezitom i kromnom rudom, ili pak materijalom za nabijanje poda. Prije punjenja peći ispust se ispunji prženim dolomitom i time začepi sa prednje strane (iz ognjišta), a čepom vatrostalne gline na začelju. Na ispust se priključuje ispusni žlijeb, vatrostalno spojen sa ispustom.



Sl. 39. Siemens-Martinova peć. 1 Glava peći, 2 gorianik, 3 kupka, 4 ispusni žlijeb, 5 troskovnik, 6 vertikalni kanali, 7 vrata za ulaganje, 8 regeneratorske komore, 9 vatrostalna mreža regeneratora, 10 ventili za uvođenje zraka i plina, 11 dimni kanali, 12 zasuni, 13 kotao utilizator, 14 dimnjak. (Brojkama označeni dijelovi, osim 13 i 14, ponavljaju se simetrično na suprotnom kraju peći)

Zidovi peći u svom donjem (vrucem) dijelu ozidani su bazičnim, a u svom gornjem dijelu silika-opekama. Prednji zid ima 3 do 5 (pa i 7) vrata koja se mehanizovano dižu i spuštaju, hlađena su vodenim hladionicima i naliježu spolja na vodom hladene okvire. Na svakim vratima je predviđen kružni otvor za osmatranje ognjišta.

Svod peći u poprečnom presjeku ima lučni profil. Luk svoda raspet je između dva reda kosih opeka specijalnog formata, koje se svojom bazom oslanjaju na zidove peći, a kosim bokom prihvataju svod. Prema izdržljivosti svoda (obično od silike, mada se sve češće primjenjuju i svodovi od bazičnih opeka) određuju se trajanja svih ostalih dijelova peći. Prelomnica između svoda peći i svoda glava peći, nalik na slovo V, u pećima loženim naftom znatno je plića nego u pećima loženim generatorskim ili prirodnim gasom.

Glave peći obuhvačaju vertikalne kanale, bočne i začelne zidove glave, uvodnike goriva, svod glave i vatreni most. SM-peći ložene generatorskim gasom (koji se mora predgrijavati) imaju posebne vertikalne kanale za gas. Vatrostalni materijal glava je uglavnom silika, ali glave mogu biti ozidane i u cjelini od bazičnih opeka. Troskovnici su također ozidani silika-opekama.

Regeneratorske komore (svod, mreža, bočni zidovi i kanali) obično su od visokokvalitetne šamotne opeke. Vazduh ili ulazi u peć prirodnom promajom (koja je varijabilna u toku svakog perioda između dva mijenjanja smjera gasova kroz peć) ili se u nju tiska ventilatorom. Ventilator ima prednost što izaziva konstantan protok vazduha kroz komore, sprečava infiltraciju vazduha kroz zidove komora, mosnog kanala i troskovnika (zaštitujući malom natpritisku ventilatorskog vazduha) i signalizuje propuške u razvodnom sistemu gasova probijanjem topline u polju zasuna i ventila.

Horizontalni kanali zidani su od drugorazrednog šamota, izolovani i zaptiveni. Ovi kanali, zasuni i ventili, zatim kanali koji iza ovih organa vode gasove u dimnjak ili pod kotao-utilizator, čine razvodni uredaj SM-peći.

Samo peći sa generatorskim gasom imaju po dvije komore, ostale (koje su ložene koksni gasom, prirodnim gasom ili naftom) imaju po jednu komoru. Svaki par komora u prvom slučaju ima po jedan zasun (za vazduh) i po dva za gas (jedan za vezu komora-izvor gasa i jedan za vezu komora-dimnjak). U svim ostalim slučajevima ovaj par zasunâ otpada.

Kotao-utilizator nalazi se između kanala koji izvodi dimne gasove iza zasunâ prema dimnjaku i dimnjaku; on omogućuje iskorijenje ~30% toplove uložene u SM-peć. Dimnjak je SM-peći potreban i kad se vazduh u nju tiska ventilatorom, jer u periodu remonta kotla utilizatora ili remonta regeneratora treba ove ohladiti vazduhom pokretanim prirodnom promajom.

Kapacitet peći kreće se od više desetina do više stotina tona.

S obzirom na sirovine ima više uložaka u bazičnu SM-peć: a) samo tečno gvožđe, b) tečno gvožđe i tečni čelik (iz konvertera), c) raskov i tečno gvožđe (uz nešto čvrstog), d) raskov i čvrsto gvožđe i e) sam raskov sa ugljikonskim dodatkom.

Uložak za prva 3 ili 4 topljenja u novoj peći ili peći sa izmjenjenim (novim) podom unekoliko se razlikuje od normalnog uloška. Na pod se ulaže najprije krečnjak (ponekad najprije nešto raskova), zatim raskov, ili prije njega ruda, ako se ruda ulaže. U odnosu na startni ugljik tečne kupke i na ekonomiku ulaganja značajno je proporcionalisanje lakog, srednjeg i teškog raskova. Krečnjaka se ulaže 5–8% (kreča 3–4%) od ukupnog metalnog uloška, zavisno od sadržaja Si, P i S u ulošku, SiO_2 u krečnjaku i rudi, S u gorivu i od učešća SiO_2 i CaO iz dolomita vatrostalne obloge u reakcijama troske. Količina dodatka rude zavisi od prirode drugih izvora kisika (kovarine, rde, reduktivnih oksida FeO i MnO u trosci, CO_2 od kalcinacije krečnjaka, kisika metala kupke oksidisanog gasovima sagorijevanja). Rude se dodaje toliko da se, uz druge izvore kisika, do trenutka kad se uložak rastopi postigne poželjan startni sadržaj ugljika i uspon krečnjaka sa poda u kupku. Rude se ulaže 0 do 25%. Kad je udio tečnog gvožđa u ulošku 40–45%, ruda se ulaže odmah na krečnjak. Inače se može ulagati i nakon što se uložak rastopi. Čvrsto gvožđe može se ulagati na raskov, ali obično se ulaže kad se jedan dio raskova rastopi. Tečno gvožđe mora se dodavati u povoljnem trenutku, ni prerano (zahlađiće ga raskov) ni prekasno (preoksidisana kupka, prenizak ugljik), već upravo u času kad je kupka dovoljno oksidirana da se nemetalni tečnog gvožđa mogu izoksidirati čim se gvožđe uloži.

Najčešće se susreće jedan od ova dva tipa uloška: a) 50% gvožđa i 50% raskova, eventualno sa otakanjem troske, b) 55...

80% gvožđa i 45...20% raskova, sa otakanjem troske. Budući da raskova u ovom slučaju ima u ulošku razmjerne malo, bitno je da se dovoljno oksidiše prije dodavanja tečnog gvožđa.

U periodu topljenja raskova loženje peći mora biti što intenzivnije, u granicama postavljenim vatrastalnošću obloge. Pošto se uložak rastopi, kad svod i zidovi upijaju više toploće nego kupka, loženje peći mora se oprezno smanjiti. Najprije se oksidišu Si i Mn u SiO_3 i MnO , a kad se oni time prevedu iz kupke u trosku, počinje se snažno oksidati ugljik u CO (koji zakuhava kupku), fosfor se oksidiše u P_2O_5 i prelazi u trosku, a sumpor prelazi u trosku koja ga fiksira kao CaS. Ako se radi sa visokom razmjerom tečnog gvožđa, pa razvijanje ugljik-monoksida uspjeni i trosku, troska (u kojoj odlaze Si i P kao oksidi, S kao sulfid) otače se kroz predviđene otvore na prednjoj ili zadnjoj strani peći. Istovremeno dovršava se oksidacija tečnog dijela uloška i topljenje čvrstog. Oksidacija ugljika u CO uslovljava ravnomjerne kuhanje nego razvijanje CO_2 iz krečnjaka, koje inače počinje kasnije, kad dovoljna količina topline prodre do poda peći, tj. do krečnjaka. Prvo kuhanje, na bazi oksidacije ugljika, zove se »oksidsko«, drugo, na bazi kalcinacije krečnjaka, »krečno«. Ako otakanje troske u oksidskom kuhanju nije efikasno, uspjenjena troska zbog mjeđuveličine gase u njoj postaje topotni izolator, a kupka hladna i nereaktivna. Zbog odsustva kuhanja ona još teže upija toplotu; stoga loženje tečnim, kaloričnijim gorivom ima znatnu prednost pred loženjem gasom. Sa opadanjem procenta ugljika u kupki i porastom temperature kupke oksidsko kuhanje mijenja karakter, a krečno postaje predominantno. Pri tome se kreči upisuje kroz kupku, koja se plahovito zakuhava ugljik-dioksidom iz krečnjaka. Taj CO_2 usput oksidiše dio ugljika, a CaO na kupki može sada zamijeniti FeO i MnO u fosfatima, sulfatima i silikatima i integrirati se u trosku; višak CaO omogućuje troski da zadrži i okside fosfora i silicijuma, jer se oni kad su vezani uz kreč teže redukuju. S obzirom na oksidišuće djelstvo ugljik-dioksida iz krečnjaka, dodatak jednog težinskog dijela krečnjaka je ekvivalentan dodatu 0,6 težinskih dijelova rude.

Krečno kuhanje ima i funkciju da konačno ujednači temperaturu i hemijski sastav kupke od poda do vrha. Za takav efekat kuhanja kupka u toj fazi još nije dovoljno fluidna i mobilna. Kreč se u troski otapa lagano; topljenje kreča se može ubrzati time što se troski dodaje tzv. topitelj ili fluks (obično fluorit) koji snižava tačku topljenja.

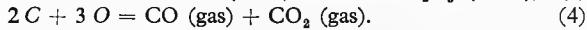
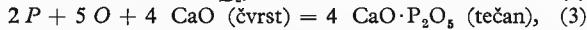
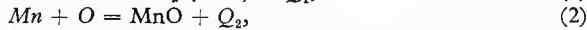
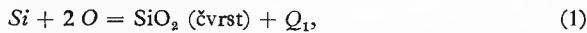
Sa završetkom krečnog kuhanja završava se i period topljenja i počinje period rafinacije čelika. Kako s opadanjem procenta ugljika temperatura topljenja čelika raste, potrebno je intenzivnije dovođenje topote češćim obrtom smjera gasova. Rafinacijom treba postići a) snižavanje sadržaja fosfora i sumpora ispod maksimalno dozvoljene vrijednosti, b) što brže eliminisanje ugljika, ali tako da se za vrijeme odugličavanja može i funkcionalno osposobiti troska i postići potrebna visoka temperatura, c) dovođenje taline u stanje u kojem se može izvršiti konačna dezoksidacija u peći, ili u kojem se može ispuštiti iz peći, pri čemu troska mora imati potreban viskozitet i hemijski sastav, a kupka željeni procenat ugljika i kisika, potrebnu temperaturu i sastav svojstven čeliku koji se proizvodi. Troska u ovom periodu mora sadržavati dovoljno oksidanata, ali na kraju rafinacije mora biti izrazito bazična. Uslovi da se postignu navedeni ciljevi zavise od propisanog sadržaja ugljika i od toga kako metal treba finalisati: kao potpuno umiren, poluumiren ili neumiren. Kako sadržaj ugljika može varirati od 1 do 0,02%, izvanredno je važan sadržaj ugljika sa kojim se metalni uložak potpuno otopi. Taj startni sadržaj ugljika mora biti za 0,3 do 0,5% iznad sadržaja ugljika sa kojim će talina biti ispuštena iz peći; vrijeme za eliminaciju tih 0,3 do 0,5% dovoljno je za osposobljavanje troske i za kontrolu sastava i temperature kupke. Izvori kisika u periodu rafinacije su pećni gasovi (kao i u periodu topljenja) i ruda (ili kisik iz kisične razvodne mreže). Kako brzina odugličavanja pećnim gasovima zavisi i od vijeka koji ima peć, sadržaj se kisika u kupki reguliše uglavnom željeznom rudom. Kad se ona dodaje, kupka mora biti dovoljno zagrijana, jer je dodatak hlađi i fizički (zagrijavanje rude) i hemijski (endoternim razdvajanjem kisika od željeza). Za svaku peć i za svaku tehnologiju proizvodnje određenog čelika postoji i optimalni dodatak željezne rude u odnosu na produktivnost peći i kvalitet čelika. Iza svakog dodatka željezne rude mora se kontrolisati sadržaj

ugljika u kupki. Pola sata do jedan sat prije ispusta taline mora se obustaviti svako dodavanje željezne rude.

Kontrola kupke i troske počinje još od istapanja metalnog uloška određivanjem sadržaja fosfora i sumpora. Ispitivanjem uzorka troske kontroliše se bilo njen sastav (spektrografskom analizom) bilo viskozitet. Svaki uzorak troske ili metala daje samo djelomičnu informaciju o prethodnom stanju u peći; tek niz uzorka omogućuje pravilnu interpretaciju stanja i predviđanje njegovog narednog razvoja. Proizvodnja čelika do određenog stepena dezoksidisanog (neumirenog, poluumirenog ili umirenog) zahtijeva kontrolu stepena oksidacije kupke na kraju rafinacije.

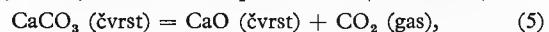
SM-proces u 200-tonskoj peći traje ~ 10 h (ulaganje i topanje metalnog uloška $2\frac{1}{2}$ h, ulivanje tečnog gvožđa u peć $\frac{1}{2}$ h, oksidsko kuhanje 3 h, krečno kuhanje $1\frac{1}{2}$ h, rafinacija $2\frac{1}{2}$ h). Otvaranjem ispušta na zadnjoj strani peći talina se preko ispusnog žlijeba izljeva u kazan. Dok se ne pojavi troska ima dovoljno vremena za legiranje, naugličavanje i dezoksidaciju u žlijebu ili (najčešće) u kazanu. U prisustvu troske usporilo bi se rastvaranje dodataka (jer se pokrivaju slojem troske) i fosfor bi se mogao vratiti u metal. Stoga, čim se pojavi troska, pusti je se u kazan još tanki sloj za izolaciju metala u njemu i izljevanje se prekine.

Reakcije u SM-procesu počinju već od časa kad se uložak nađe u peći. Kisik iz gasova, CO_2 i H_2O oksidišu dio uvijek prisutnih C, Si, Mn i P, takođe Cr, V, Ti, Al, W, Nb, Zn itd., koji ne moraju uvijek biti prisutni. Eventualna redukcija nekih od oksida ovih elemenata, kasnije za vrijeme rafinacije, zavisiće od njihove mase i sastava troske. Izuzev ugljika, koji se eliminise kao CO, svi elementi se, po zakonima za hemijske reakcije heterogenih sistema, raspodjeljuju u odgovarajućoj ravnoteži između troske i kupke. Cu, Ni, Mo, Co, Sn, As, itd. ostaju u metalnoj kupki jer bi se mogli eliminisati tek nakon potpune oksidacije željeza. Reakcije koje slijede iza perioda topljenja zavise od sastava uloška. Što je dodato više raskova to treba manje željezne rude, srazmerno treba manje i krečnjaka jer funkciju oksidanta preuzima raskov oksidisan u peći. Kad se doda tečno gvožđe, dolazi do reakcija:



U tim jednadžbama Q znači toplotu reakcije, a koso štampan simbol znači da je taj element u metalnoj kupki. Bazični oksid MnO i kiseli oksid SiO_2 uglavnom se uzajamno neutralisu u silikat, koji čini prvu trosku i opstoji dok se u krečnom kuhanju u trosku ne uspne CaO koji raskraja silikat mangana i tvori kalcijum-silikat. Za eliminaciju fosfora nije dovoljan samo kisik, već je potreban CaO koji nastali P_2O_5 vrlo reaktivan, veže najvjerovaljnije u fosfat $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$. Sumpor se u SM-peći ne može efikasno eliminisati. Oksidativnom atmosferom i brzim topljenjem mora se spriječiti da sumpor iz gasova prede u metal, u kojem je najvjerovaljnije vezan u obliku FeS i MnS, dok je u troski najvjerovaljnije u obliku kalcijum-sulfida ili kalcijum-sulfata. Zato se stepen potpunosti reakcije uklanjanja sumpora iz metala i izražava odnosom sadržaja sumpora u troski prema sadržaju sumpora u metalu. Ni FeS ni MnS ne mogu se oksidirati u SM-peći, tako da taj odnos i nije određen stepenom oksidacije, već sastavom troske. Rijetko se u SM-peći može eliminisati više od 50% sumpora iz metala.

Prije završetka reakcija perioda oksidskog kuhanja (reakcija 1 do 4), krečnjak dostiže temperaturu svoje kalcinacije:



CO_2 zakuhava kupku i time se ubrzava prenos toplotne iz plamenu u metal. CaO u troski smjenjuje FeO i MnO iz njihovih silikata, a pospješuje i uklanjanje fosfora iz metala. Sa pridolaskom CaO u trosku ova postaje bazičnija i sposobnija da zadrži sumpor. Troska obrazovana u periodu krečnog kuhanja vrlo je složena tečna smjesa kalcijum-silikata, kalcijum-sulfata ili -sulfida, dvostrukih silikata kalcijuma, kalcijum-fosfata ili dvostrukih fosfata, oksida Fe, Mn (i drugih oksidabilnih elemenata iz uloška), aluminijum-oksida, magnezijum-oksida, krom-oksida, itd. (iz rude, krečnjaka ili vatrastalne obloge). CaO mora ne samo neutralisati SiO_2 već i svojim viškom sniziti sadržaj fosfora u metalu. Odnos

$\text{CaO} : \text{SiO}_2$ u troski treba da bude 2 : 1. Kad je sadržaj Si u ulošku visok, troska se mora otočiti (debeo sloj troske topotno bi izlozao kupku), čime se eliminiše iz peći SiO_2 i P, ali i FeO i MnO iz prvog stepena formiranja troske, zbog čega se ovi oksidi moraju nadomjestiti dodatkom željezne rude. Otakati se mora prije krećnog kuhanja. Prednost je otakanja troske i u tomu što se njime smanjuje volumen troske i potrebna količina topitelja.

U periodu rafinacije sve reakcije se odvijaju kroz trosku, a njihov cilj je oksidacija preostalog fosfora u metalu i njegovo neutralisanje u troski, eliminacija ugljika do nivoa na kojem počinje završni period i podizanje temperature kupke do visine potrebne za završavanje topljenja i za ispust taline iz peći. Eliminacija ugljika mora biti uskladena sa porastom temperature. U ovom periodu moraju se, uz sastav i temperaturu metala, kontrolisati temperatura, viskozitet i sastav troske kao glavnog sudionika reakcija sa kupkom.

Hemiske reakcije u troski i u kupki, ili između njih, slijede zakone Nernsta, Raoulta, Henryja, Guldberga i Waagea, i van't Hoffa. Hemski je SM-proces i bazičan i oksidacijski proces, te promjene u sastavu troske imaju određena djelstva na ova dva faktora SM-procesa. Glavni predstavnik bazā u SM-troski je CaO , a kiselina SiO_2 . Odnos sadržaja FeO u troski SM-procesa prema O u metalu je funkcija odnosa CaO/SiO_2 u troski. Ako je $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2 : 1$, FeO u troski ima dvjesta puta više procenata nego kisika u metalu, tako da npr. pri 10% FeO u troski ima 0,05% O u čeliku. Eliminacija fosfora zahtijeva vrlo oksidativnu i bazičnu trosku. Eliminacija sumpora (distribucijom između kupke i metala) zahtijeva velik volumen troske, visok bazicitet i nizak sadržaj FeO u troski. No ova dva posljednja uslova u SM-peći su neuskladiva. U početku završnog perioda eliminacija Mn i nemetala, izuzev C, mora uglavnom biti završena, a S i P moraju biti stabilizovani u troski takvog sastava da ne dolazi do njihovog povratka u metal. Sadržaj ugljika opada u ovom periodu sporo, jer više nema dodavanja rude. U završnom periodu finalna dotjerivanja temperature i sastava vrše se u peći, kazanu ili u kokilama, na bazi hemijskih analiza iz ovog perioda.

Eliminacija ugljika u svim periodima zavisi od dotura kisika. Kako je difuzija kisika iz troske sporija od same reakcije odugličavanja na temperaturama SM-peći, ova reakcija brzo dostiže izvesnu dinamičku ravnotežu (sadržaj ugljika lagano pada i nikada nema velikog viška kisika). Efekt temperature na ovu reakciju nije značajan, ali je takav da na visokim temperaturama može dosta ugljika i kisika koegzistirati. Ako treba usporiti odugličavanje, vrši se tzv. blokiranje taline dodatkom dezoksidatora (gvožđa, ferolegura) koji snižavaju sadržaj kisika u kupki do ispod količine potrebne reakciji ugljika i kisika. Blokiranje je, naravno, vremenski ograničena mјera. U kazanu i kokilama dovodi se do reakcija kojima je cilj konačna dezoksidacija, konačno dotjerivanje sastava i legiranje za postizanje specijalnih svojstava čelika. Elementi dezoksidanti imaju ovaj redoslijed snage, od veće prema manjoj: Al, Ti, V, Si, C, Mn, Cr. Sa padom temperature snaga dezoksidacije se pojačava. U kokilu se za neumirene čelike dodaje nešto aluminijuma, za poluumirene ferosilicijum ili aluminijum, a za umirene aluminijum. Dodaci u kokilu ne smiju biti obimi.

Kiseli SM-proces. Ognjište kisele peći je po obliku slično ognjištu bazične peći, ali su materijali ognjišta različiti: bazične opeke su zamijenjene kiselim, a opeke iznad ognjišta isključivo su kisele. Prije formiranja poda kisela peć se suši i zagrijava kao i bazična. Na silika-opeke prospe se dovoljno kremena ili granitnog ivera. Intenzivnim grijanjem ovaj materijal se stopi i djeluje kao veza između opeka i slojeva pjeska (sa 94...97% SiO_2) kojima se uzastopno glazira pod do potrebne debljine. Pošto se formira pod, otvori se ispust i ponovo zatvori smjesom antracita (ili koksa) i pjeska. Ognjište se zatim napuni do polovine troskom kiselog SM-procesa, troska se istopi, posebnim alatom se i bokovi ognjišta prelju tečnom troskom i najzad se troska ispusti. Time je pod vitrificiran.

Prve 3...4 taline lakše su od normalnih talina. Uložak za prvu talinu je uglavnom hladno gvožđe i raskov. U kiselom procesu se ne ulaže ruda kao u bazičnom, jer bi FeO (baza) brzo razorio pod i bokove ognjišta (kiseli materijal). Iz istog razloga se ne

može ulagati ni sam raskov. W. Siemens je ulagao samo gvožđe, a oksidaciju kupke ubrzavao ulažući rudu. E. i P. Martin su ulagali raskov i dovoljno gvožđa za startni sadržaj ugljika. Današnja praksa je kombinacija njihovih postupaka. U kiseloj peći eliminisu se od fosfora samo tragovi, od sumpora ništa. Stoga je važno da se pažljivo odabere raskov, jer se gvožđe još lako kontroliše. Gvožđem se raskov štiti od oksidacije, čime se izbjegava da oksidi željeza i mangana erodiraju pod i neutralisani izgube funkciju oksidanta i neutralizatora za nemetale u gvožđu. Nakon istapanja uloška kupka treba da sadrži 0,2...0,4% C iznad potrebnog. Troska sadrži 50% baza (uglavnom $\text{FeO} + \text{MnO}$) i 50% kiselina (uglavnom SiO_2). U sadjejstvu sa oblogom ognjišta troska se praktički sama podešava, a tok topljenja prati se prema boji uzoraka troske ili mjerjenjem njenog viskoziteta. Preniska oksidacijska moć troske korigira se krećom ili rudom, a prevelika dodavanjem ugljika i loženjem. Talina u kojoj je, uslijed pogrešno sastavljenog uloška, postotak sumpora i fosfora visok mora se odbaciti, jer za taj slučaj nema korektivnih mјera. Kad se dostigne potrebna temperatura taline i potrebno stanje troske, talina se blokira. U kiselim SM-procesu dodaci se daju kako u peć tako i u kazan. U kokilu se dodaje samo aluminijum.

U kiselim procesu Si, Mn i C eliminisu se u dva navrata: u periodu topljenja i u periodu kuhanja. U prvom periodu izvor kisika su samo pečni gasovi. Srećna je okolnost da je tačka topljenja bijelog gvožđa niža od tačke topljenja prve troske, inače bi tečna troska prokupala do poda i rastvarala ga. Iza Si i Mn oksidiše se i P, ali čim poraste sadržaj SiO_2 u troski, P se vraća u metal. Do potpunog istapanja uloška oksidiše se znatan dio Si i Mn, kao i dio C. Ako je topljenje brzo, oksidacija raskova nije dovoljna pa se mora dodati ruda, ako je sporo, ruda je izlišna. Mechanizam eliminacije nemetala isti je kao i u bazičnom SM-procesu.

Elektrolučni procesi. Za proizvodnju ingota afirmisala se samo bazična, a za proizvodnju čeličnog liva i otkovaka kisela elektrolučna peć. Bazična peć ima bazični pod od magnezita ili dolomita, bočne zidove i svod od bazičnih ili silika-opeka, a kisela peć ima pod od silika-pjeska, bočne zidove i svod od silika-opeka. Kiseli elektrolučni proces metalurški se razlikuje od bazičnog time što raskov za kiselu peć mora biti biran (nizak P i S). Zbog odsutnosti P i S u kiseloj peći kraća je oksidacija i rafinacija nego u bazičnoj i radi se mahom samo sa jednom troskom, pa su i gubici željeza u kiseloj peći manji nego u bazičnoj.

U elektrolučnom procesu može se raditi kako sa raskovom tako i sa tečnim metalom. Ovim procesom mogu se proizvesti skoro svi kvalitetni čelici. Elektrolučni proces je naročito ekonomičan ako proizvodnja ugljičnog i niskolegiranog čelika nije tako velikog obima da opravdava kombinaciju visoka peć—SM-peć, i ako stoji na raspoloženju dovoljno raskova, a rastojanje do izvora koksa, krečnjaka i kvalitetne rude je veliko. Elektrolučnim procesom se tada može proizvesti umireni čelik sa nižim rezidualnim sadržajem fosfora, jer uložak sadrži manje fosfora nego uložak procesa na bazi gvožđa, a osim toga oksidišuća troska koja sadrži fosfor može se otočiti iz elektropeti prije dezoksidacije i time sprječiti povratak fosfora u metal. Najzad, reduksijske troske u elektrolučnom procesu omogućuju proizvodnju čelika sa nižim rezidualnim fosforom. Elektrolučni proces ima i brojne druge prednosti. Dezoksidacija je moguća u peći jer nema izvora kisika (kao u SM-peći) koji bi tu dezoksidaciju mogao sprječiti; to i mogućnost rada sa reduktijskim troskama znači manje nemetalnih uključaka u čeliku. Čelici sa visokim postotkom lako oksidabilnih elemenata lako se proizvode jer se ti elementi mogu legirati u peći pod reduktivnim uslovima: štaviš, ti se elementi mogu i rekuperisati iz odgovarajućeg raskova. Naginjanjem peći troska se lako otače pa radni volumen peći može biti minimalan; sastav taline tako malog volumena lako se reguliše topiteljima, oksidantima ili dezoksidantima. Uslijed lake regulacije zagrijavanja prostora peći i oksidabilne troske laka je i kontrola sadržaja ugljika. Mada nema osobite cirkulacije u kupki, pa rafinacija reduktivnim troskama traje srzajmno dugu, smjena oksidativne troske (u kojoj se eliminise fosfor) omogućuje visok stepen rafinacije, eliminisanim kako sumpora tako i kisika; uz to je i relativno mnogo manje proizvoda dezoksidacije i oni lakše isplivaju nego kad treba dodati mnogo dezoksidanta u kazan. U finalnom čeliku proizvedenom takvim procesom ima bitno manje sulfidnih i oksidnih uključaka.

Nedostatak elektropeći jest njen relativno malen proizvodni kapacitet, pa se u tom pogledu teško može mjeriti sa SM-peći. Veće elektrolučne peći iziskuju i veći napon za ekonomičan prenos električne energije, a duži lukovi u većim pećima mogu oštetiti svod i oblogu. Osim toga vršna opterećenja u periodu topljenja stvaraju teškoće elektranama jer one moraju raspolažati dovoljnom snagom da pokriju redovnu potrošnju za vrijeme tog vršnog opterećenja.

Kapacitet elektrolučne peći određen je njenim unutrašnjim prečnikom koji iznosi od 2 do 7 m. Zavisno od prečnika peći, masa uloška kreće se od 2,7 do 155 t, maksimalna masa od 3,6 do 180 t, a kapacitet transformatora od 1500/1800 do 30 000/35 000 kVA. Sve peći konstruisane su tako da se mogu naginjati i na prednju stranu (za otakanje troske) i na zadnju (za izljevanje metalra). Oblik peći je cilindričan (sl. 40). Tijelo peći sastoji se od

tehnikom elektrode se periodički produžuju kako se troše u peći. (Söderbergove kontinuirane elektrode jedva da dolaze u obzir za elektrolučne čelične peći.) U svodu peći nalaze se u vrhovima ravnostranog trougla opisanog oko centra svoda otvori kroz koje prolaze elektrode u peć. Prsten koji steže elektrodu i povezuje je sa nosačem u obliku obrnutog slova L (vertikalni jarbol i horizontalni krak) i prsten koji je umetnut u otvor na svodu hlađeni su vodom. Prsten oko elektrode je ujedno mehanizam za njeno stezanje (sistem pneumatske opruge) i priključak za uvod električne energije u elektrodu.

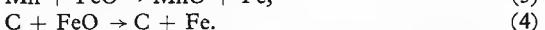
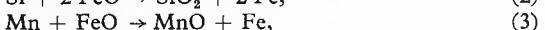
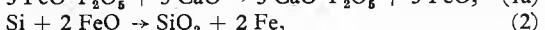
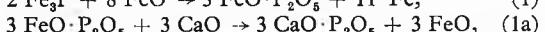
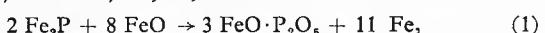
Za razliku od transformatora velike snage, transformatori za elektrolučnu peć imaju na primarnoj strani spoj zvijezda-trouga, uz nekoliko stupnjeva snage. Prelaskom sa spoja trouga na spoj zvijezda sekundarni napon se smanjuje u omjeru 1 : 0,58.

Bazični elektrolučni proces. Radi smanjenja investicija u početku su elektropeći bile aneks SM-čeličane, ali to je imalo tehnoloških nedostataka, kao npr. opasnost nedovoljnog razlučivanja raskova, nauglijčavanje iz miksera kao izvora ugljika, dekoncentraciju tehničkog vodstva u odnosu na kvalitet proizvodnje elektropeći. Stoga se danas elektropeći postavljaju u zasebnu elektročeličanu, po mogućnosti sa natkrivenim raskovnim dvorom.

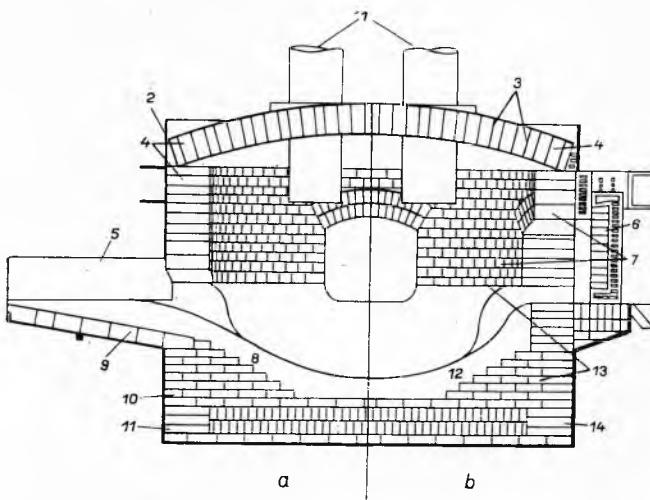
Razlučivanje raskova u grupe određenog sastava još je važnije nego kod SM-procesa. Ako u talini ostanu nepoželjni elementi, kao npr. bakar ili nikal, talina se mora odbaciti u raskov ili preklasifikovati, a s druge strane može se oksidisati elemenat koji je poželjan i koji se oksidacijom zbog nepoznavanja sastava uloška na taj način gubi. Sastav uloška treba da je takav da obezbijedi donju granicu propisanog postotka dotičnog elementa u određenom čeliku. Prije nego se peć u kojoj je topljen visokolegirani čelik upotrijebi za topljenje niskolegiranog čelika, njezino seognjište mora »isprati« posrednom talinom, da nepoželjni elementi upijeni pri prvom topljenju u pod i bokove peći ne bi prešli u niskolegiranu talinu.

Za optimalnu prostornu težinu uloška u peći ulaže se 40% teškog, 40% srednjeg i 20% lako raskova. Najprije se uloži tanak sloj srednjeg ili lako raskova na pod, zatim se tamo gdje će doći elektrode uloži teški raskov. Najzad se uloži srednji i laki raskov po periferiji pećnog ognjišta radi zaštite svoda i vertikalnih zdova od električnog luka za vrijeme topljenja. Ferolegure i legirajući oksidi, kao i legure koje se ne mogu lako oksidisati, ulaze u peć prije istapanja uloška. Uložak treba topiti sa viškom sadržaja ugljika od 0,15 do 0,25% iznad potrebnog u gotovom čeliku. Manjak se nadoknadjuje pomoću sredstva za nauglijčavanje, višak se eliminiše rudom ili kovarinom.

Najtipičnije je i relativno najkomplikovanije topljenje sa hladnim uloškom i dvostrukom troskom. Proses u ovom slučaju ima 4 perioda: a) topljenje i oksidacija, b) ispuštanje troske, c) reduksijski period i d) ispuštanje taline. Po završenom ulaganju elektrode se spuste na 25 cm iznad raskova, uključi se energija sa srednjim naponom i odgovarajućom strujom tokom 15 min, dok se elektrode ne probiju u raskov, čime se zidovi i svod zaštićuju od luka. Onda se napon i struja povise do maksimalne vrijednosti. Čim se na podu formira prva lokva metala, njenom radijacijom zagrijava se raskov i odozdo. U ovom periodu odvijaju se reakcije oksidacije P, Si, Mn i C:



Izvori su kisika za ove reakcije oksidi na raskovu, slobodni kisik u atmosferi peći, oksidi nastali od raskova za vrijeme topljenja, ugljik-dioksid iz krečnjaka, gasovi u peći, oksidi legirajućih elemenata dodatih u peći, ruda i kovarina, uvedeni gasoviti kisik. Oksidacijski period u bazičnom elektrolučnom procesu analogan je istom periodu u SM-procesu s time da se zbog mogućnosti vrucog topljenja fosfor lakše vraća u metal i da se kisik dovodi nekontinuirano. Odnos bazičnih oksida (CaO , MnO , MgO , FeO itd.) prema kiselim (SiO_2 , P_2O_5 , Fe_2O_3), mjerena odnosom $\% \text{CaO}/\% \text{SiO}_2$, mora biti 2,2 do 2,8, dakle veći nego u SM-peći (zbog više temperature u elektropeći i lakšeg povratka fosfora u kupku, ako nije jako bazična).

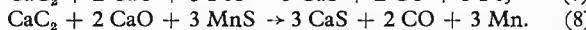
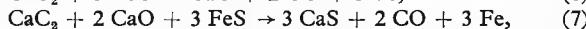
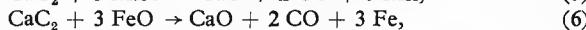


Sl. 40. Presjek Héroultove elektrolučne peći. a Kisela obloga, b bazična obloga. 1 Elektrode (treća se ne vidi), 2 vodom hlađeni prsten poklopca, 3 dilatacioni ulošci, 4, 10 silika-opeka, 5 izlivni žlijeb, 6, 9, 11, 14 šamotna opeka, 7 silika-opeka ili opeka obložena metalom, 8 mljevena kremsena smješta, 12 magnezitna smješta, 13 magnezitna opeka

čeličnog plašta (zakovanog ili zavarenog) i vatrostalne obloge. Plašta kao integralni dio peći osjetljiv je jer se vitoperenje i prskanje plašta može prenesti i na operativne dijelove koji su na plaštu montirani. Ovo se izbjegava time da se plašta odijeli od ostalih dijelova u strukturi peći. Dno plašta je ravno. Na slojeve šamotnih opeka postavljeni su slojevi magnezitnih (bazične peći) ili silika-opeka (kisele peći), zatim granulisan materijal poda i bokova ognjišta: magnezitna mješavina (bazične peći) ili kvarni pjesak (kisele peći). Iznad ognjišta cilindrični zid peći ozidan je silika-opeksam, blago zakriviljen svod također je izведен od silika-opeke. Elektrolučna peć može se puniti kroz vrata s prednje strane (ručno ili mašinom) ili pak odozgo, pošto se gore otvori pomicanjem svoda ustranu. Pred svaku elektrolučnu peć mora na prednjoj strani biti postavljena fiksna ili rotaciona plamena peć za sušenje dodataka, kako vlaga u njima ne bi izazvala eksplozije i adsorpciju vodika u čeliku. Na izlivnoj strani mora biti mosna dizalica (npr. 100-tonka za 60-tonске taline). Livni kazan, čepovi i livne kape moraju se prije upotrebe sušiti i predgrijavati da bi se izbjeglo eksplozivno razvijanje pare i da bi se smanjio termički šok opeka i njihov zahladni uticaj na tečni metal.

Razlikuju se dva tipa elektroda za elektrolučne čelične peći: amorfne, na bazi antracita sa niskim sadržajem pepela, i grafitne na bazi petrološkog koksa. Sirove elektrode se peku bez dodira sa vazduhom u gasom loženim pećima na 1200 do 1300 °C. Grafitne elektrode se, osim toga, još jednom, izolovano od vazduha, peku u električnim pećima na 2400...2500 °C radi kristalizacije ugljika u grafit. Obje vrste elektroda su netopljive, nerastvorljive, hemijski inertne, elektroprovodne, mehanički i termički čvrste. Grafitne elektrode uz isti presjek mogu se opteretiti dva puta većom strujom nego ugljene pa se i upotrebljavaju za velike peći, a za manje elektrolučne peći (do kapaciteta transformatora 300 kVA) služe ugljene elektrode. Posebnom

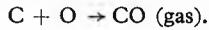
Oksidacijska troska se otoči naginjanjem peći i odmah se stvara reduksijska troska, npr. standardnom smjesom 5…8 dijelova kreča, 0,5…2 dijela fluorita, 1…2 dijela koksognog brašna, 0,5…1 dijela kremenog pijeska. Pijesak i fluorit dodaju se da bi se brzo istopio kreč, a koks da bi se stvorili karbidi. Koks se obično dodaje pošto se troska razrijedi. Za niskougljične čelike (manje od 0,12% C) upotrebljava se troska na bazi kreča i kremena, kreča i aluminijum-oksida ili modifikovana karbidna troska sa manje koksa. Karbid ne može egzistirati u prisustvu elemenata koje ugljik redukuje, pa u karbidnoj troski nema takvih elemenata. Osim toga karbidna troska odsumporava metal:



Najzad, karbidna troska prevodi i Cr, V i W (isto kao i Fe i Mn) iz njihovih oksida u metal. Za duboko odsumporavanje dolaze u obzir i dvije karbidne troske. Pod karbidnom troskom metal ostaje samo koliko je prijeko potrebno. Kad se svi legirajući elementi dodaju i istope, troska se ferosilicijumom ponovo preformira. Aluminijum za usitnjavanje zrna dodaje se pred sam ispuštanje. 10…15 min iza dodatka ferosilicijuma i aluminijuma metal se ispušta, a poslije njega troska, tako da ova služi kao pokrivač čeliku za vrijeme ispuštanja. Ispušni žlijeb moraju biti glatki, inače nastaje neravan mlaz čelika koji se lako oksidiše. Talina se, radi homogenizacije sastava, može i pretočiti iz prvog kazana u drugi.

45-tonска peć, npr., troši 450 kWh za topljenje i 97 kWh za rafinaciju jedne tone sirovog čelika.

Kiseli elektrolučni proces. Ovaj proces primjenjuje se uglavnom za proizvodnju čeličnog liva. Postoje četiri glavne varijante ovog procesa: a) parcialna oksidacija, b) potpuna oksidacija (sa jednom troskom), c) puna oksidacija sa redukcijom Si i d) laborisanje sa dvije troske (FeO u troski $\leq 10\%$). Najčešće primijenjena varijanta je potpuna oksidacija. Proces se u toj varijanti vodi prema uzorcima troske. Na istopljen metal prospere se nešto željezne rude i pijeska. Sloj formiran troske ne treba da je debiji od nekoliko milimetara, ali ga ne smije biti ni pre malo, jer kupka uzima onda silicijum-dioksid iz ognjišta. Uzorak troske iz perioda topljenja je staklast i crn zbog visokog sadržaja FeO potrebnog za naredno iskuhanje ugljika, koji i ovdje mora biti prisutan u nešto većoj količini nego što odgovara željenom sadržaju ugljika u čeliku. Ako je uzorak troske sred ili zelenkast, to je znak nedovoljnog sadržaja FeO, pa se mora dodati ruda. Mn i Si treba da se oksidisu još dok kupka nije osobito vruća, dakle prije eliminisanja ugljika. Kad je troska crna i sadržaj ugljika u kupki dovoljno visok, temperatura kupke se podiže i time stvore uslovi za kuhanje:



Tokom kuhanja troska postaje gušća, svjetlijaa i boje zelene poput graška. Tada se podesi sadržaj ugljika, Si, Mn i ferolegure za dezoksidaciju se dodaju, pa čim se istope i rastvore u kupki, metal se ispušta. Na opisani način se proizvodi ugljični čelik. Ako se legiraju Cu, Ni i Mo, oni se mogu dodati svakoj fazi procesa, ali najkasnije 15…30 min prije ispuštanja metala. Kad se dodaje Mn da bi njegov sadržaj u čeliku bio veći od 1,25%, mora se kisela troska prije ispuštanja neutralisati krečom. Krom kao 68%ni ferokrom sa 6% C dodaje se samo u dezoksidisanu kupku — odmah iza finalnog dodatka ferosilicijuma.

Indukcijski proces. Iako induksijski proces može biti bažičan ili kiseo, ova razlika nema u njemu ono značenje koje ima u drugim procesima proizvodnje čelika jer induksijski proces je u suštini samo topljenje čelika čiji je sastav već fiksiran strogo biranim metalnim uloškom. Topljenje je ujedno gotovo jedina metalurška operacija u ovom procesu, kojim je zamijenjen stari lončani proces. Uložak za induksijsku peć, koja je srednjefrekventna ili mrežnofrekventna s obzirom na električnu instalaciju, može biti i od jednog komada. Ako se i sastoji od lakog raskova, ipak je potrebno da se zbog strujnog, odnosno toplotnog kola najprije ulože krupniji pa oko njih sabiju manji komadi. Poklopac peći je nepropustan za gasove da bi se spriječila oksidacija i osigurala toplotna izolacija kupke (u drugim procesima ovu funkciju ima

troska). Kad se uključi struja, brzo alternirajuće magnetno polje sa visokom gustinom toka proizvedeno u primarnom namotaju generiše jaku sekundarnu struju u ulošku, a ova se pretvara u toplotu. Toplota nastaje uglavnom na periferiji uloška, ali se konvekcijom brzo prenosi u njegovu masu. Tečni metal iz prve lokve metala brzo poteče pod motornim djelovanjem struje oblikujući još neistopljene dijelove uloška i ubrzavajući time njihovo istapanje. Ako se pak radi sa izvjesnom količinom troske, uslijed motornog efekta struje metal i troska se intenzivno izmiješaju i time se ubrzava rafinacija kupke. Inače ovaj motorni efekat obezbjeđuje i homogenost metala i sprečava njegovo pregrijavanje. Odmah po prestanku rafinacijskih reakcija otače se troska (ako se radi sa rafinacijom), dodaju se dezoksidanti i/ili legirajući metali i kupka se izljeva. Po toni istopljenog čelika troši se ~ 650 kWh. Topljenje traje 1…1½ h.

Na jedan mjenjač frekvence može se priključiti više peći, najčešće dvije koje su naizmjenično u pogonu. U induksijskoj peći najviša temperatura kojoj se raskov izlaže jest temperatura kupke (u elektrolučnoj peći temperatura u luku iznosi i 4000 °C), pa je induksijska peć vanredno podesna za proizvodnju čelika s visokim sadržajem kroma (u elektrolučnoj peći ispari se do 15% Cr iz raskova). Temperatura kupke u induksijskoj peći može se držati u dosta uskim granicama, ± 5 °C. Raniji mjenjač frekvence, motor-generator, zamijenjen je mjenjačem na živin luk koji, pored ostalog, ima i prednost automatskog prilagođavanja frekvenčnoj karakteristici sekundarnog kola. Indukcijska peć može se zajedno sa livnim uredajem staviti u sud evakuisan ili pak stavljeni pod pritisak određene atmosfere. U ovom drugom slučaju moguće je dezoksidisati metal ugljikom ili vodikom koji daju gasovite produkte dezoksidacije. Topljenjem pod vakuumom, pak, isključuje se stvaranje nitrida i karbonitrida u čeliku, a isključenje kisika smanjuje gubitke metala i dopušta tačnu kontrolu sastava legura sa lako oksidabilnim komponentama. Isparljivost mangana, aluminijuma i kroma suzbija se topljenjem čelika pod atmosferom inertnih gasova.

Dupleksni i tripleksni procesi. Kombinacije dva procesa proizvodnje čelika zovu se dupleksni, a kombinacije tri procesa zovu se tripleksni procesi.

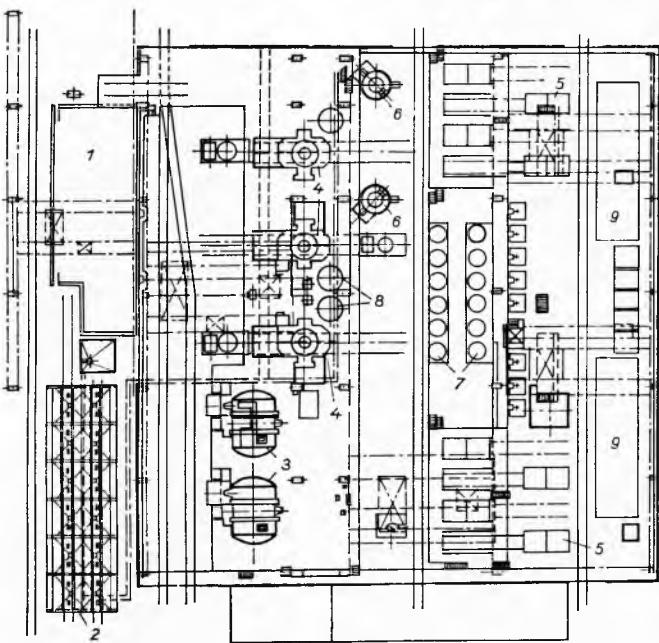
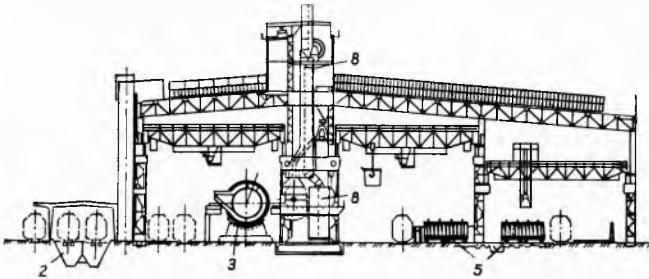
Dupleksni proces, npr. kombinacija Bessemer-SM, sastoji se u tome da se propušta struja vjetra kroz tečno gvožđe u Bessemerovom konverteru do oksidacije silicijuma, mangana i većeg dijela ugljika, zatim prenosi ovako dobijeni polučelik (predmetal) u bazičnu, nagibnu SM-peć u kojoj se fosfor i ostatak ugljika djelovanjem FeO i kreča oksidišu i svode na željenu mjeru. Proces se zatim dovrši rekarburiranjem i dezoksidiranjem čelika kao u SM-procesu. Kombinuje se, npr., rad tri 20-tona konvertera sa jednom 200-tonskom nagibnom peći. Dupleksna čeličana mora imati najmanje dva miksera. Kad se proizvodi čelik iz gvožđa s visokim sadržajem fosfora, topljenje počinje od takozvanog dominantnog ostatka metala (~ 30 t), tj. metala koji je preostao od prethodne taline (~ 175 t). Na ovaj se ulijeva 80% sljedećeg uloška polučelika, koji impregniše finalnu bazičnu trosku prethodne taline svojim fosforom, a zatim se fosforom obogaćena troska otoči iz peći. Potom se ulože troskotvorne komponente, kreč i oksidi, za rafinaciju metala. Prednosti ovog postupka jesu: skraćeno trajanje topljenja (ušteda goriva), produžavanje vijeka peći eliminisanjem silicija još u konverteru, eliminisanje opasnosti onečišćavanja nepoželjnim elementima iz raskova, svodenje na minimum reakcije između troske i čelika za vrijeme ispuštanja i elastičnost procesa u odnosu na uložak. Nedostaci dupleksnog procesa jesu: veliki investicioni troškovi (za SM i za konvertersku čeličanu istovremeno), dodatni pogonski troškovi zbog dvostrukе konverzije, visok postotak fosfora u troski koja ostaje u peći poslije izliva čelika, mogućnost da dominantni ostatak bude izložen jeksi oksidaciji prije nego što se peć ponovo napuni, nemogućnost češće kontrole poda peći, veći sadržaj azota nego u normalnom SM-čeliku. Osim postupka s dominantnim ostatkom metala prethodne taline razrađeni su i postupci bez dominantnog ostatka (suh pod) i postupak kombinacijom metoda raskova i konvertovanog predmeta.

Tripleksni procesi predstavljaju samo istorijski zanimljiv pokušaj da se i kombinacijom konverter - kisela ili bazična SM-peć - elektrolučna peć, proizvede kvalitetan čelik koji se inače dobija normalnim

elektrolučnim procesom. Brzo je utvrđeno da se i samim dupleksnim procesom može postići isti cilj.

Kisično-mlazni pneumatski procesi. U ovu grupu procesa idu LD-proces i rotorski procesi, sa varijantama koje se upotrebljavaju za konverziju Thomasovog gvožđa u kvalitetne čelike: npr. proces LDAC (v. dalje). U širem smislu u ovu grupu spadaju i klasični (vazdušno-pneumatski SM i elektrolučni) procesi ukoliko se služe bilo specijalnom strujnom smjesom u kojoj dominira kisik (smjesa O₂ + H₂O-para ili O₂ + CO₂) u modifikovanom Thomasovom procesu), bilo kisikom za ubrzanje sagorijevanja goriva (gasova, mazuta, uglja) u SM-procesu, bilo mlazom čistog kisika za rafinaciju kupke u SM-procesu ili elektrolučnom procesu.

Proces LD (Linz-Donawitz). Do pojave LD-procesa gvožđe sa sadržajem fosfora suviše velikim za Bessemerov, a suviše malim za Thomasov proces nije se moglo pneumatski preraditi u čelik.



Sl. 41. LD-čeličana. 1 Raskovni dvor, 2 dubinski bunkeri, 3 mikseri, 4 LD-konverteri; iznad miksera i konvertera dizalica za šaržiranje; 5 kokile na livnom podestu; iznad njih lijevo mosna dizalica s kazanom za livenje, desno mosna dizalica s uređajem za stripovanje; 6 peć za kazanske čepove, 7 podest za kazane, 8 uredaj za otprašivanje, 9 rešetke za kokile

Kao Bessemerova čeličana i Thomasova čeličana, tako se i LD-čeličana, odnosno LD-konverteri, snabdijevaju tečnim gvožđem iz miksera (dva miksera po 500 t za tri 30-tonска konvertera ili jedan od 1000 t za dva 30-tonска konvertera). Duvaljke vazduha za Bessemerovu i Thomasovu čeličanu zamjenjene su u LD-čeličani kisikanom, odnosno rezervoarom kisika pod pritiskom (~ 25 at). Vertikalni i horizontalni presjek jedne LD-čeličane prikazan je na slici 41.

Sam LD-konverter ima oblik kazana, sa kolektorskom kapom za prašinu, ekscentrično ili koncentrično ušće (slika 42), odvojivo ili fiksno dno, oblogu od jednog reda magnezitne opeke i naboje sloja smjese katrana i magnezita, tako da je to najjednostavnija peć za proizvodnju čelika. Kopljje kojim se uvodi kisik u konverter hlađeno je vodom, ima bakarnu mlaznicu i uredaj za vertikalno pomjeranje po osi konvertera. LD-konverter montiran je na

rukavcima kao i Bessemerov i Thomasov konverter, može se, dakle, naginjati za zalijevanje ili za izljevanje.

Uagnut konverter zaspje se najprije raskov i zalije tečno gvožđe. Konverter se zatim ispravi, kopljje spusti 65 do 100 cm duboko u kupku, uključi se kisik i žlijebom zaspje krečnjak.

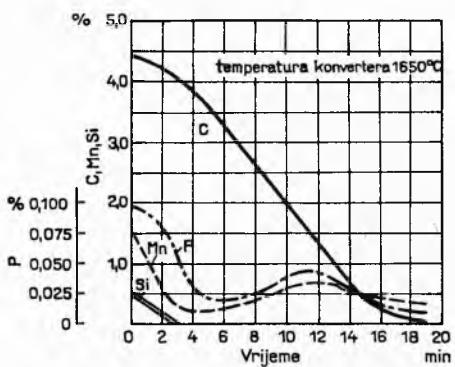
Reakcija nastupa odmah. U toku procesa dodaju se kreč i raskov radi formiranja troske i radi regulisanja temperature. Završna tačka manifestuje se iščezavanjem lepršavog plamenja na ušću konvertera. Kopljje se tada

izvuče i istovremeno se isključi kisik. Konverter se zatim nagne i u najveći dio troske se iz njega pažljivo odlije a njen ostatak zajazi krečnim nasipom na ušću konvertera, da bi se zadržala pri izlivanju čelika iz konvertera u kazan. Proces propuštanja struje kisika traje 20–22 minute uz potrošnju od 70 m³/min kisika pod pritiskom od 9 at. Po toni sirovog čelika potrošnja kisika iznosi 50–60 m³.

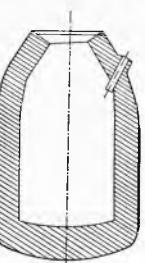
Zahvaljujući upotrebi tehnički čistog kisika (99,5–99,8%), LD-proces je pneumatski proces bez azotnog balasta, tako da mu ni silicijum (kao u Bessemerovom procesu) ni fosfor (kao u Thomasovom procesu) nisu potrebni kao davaoci toplotne energije. Tečno gvožđe za taj proces može sadržati u širokim granicama Si (0,05–1,4%), Mn (0,8–2,8%), P (0,08–0,25%), pored 4–4,2% C i najviše 0,045% S. Ako je sadržaj fosfora iznad 0,5%, mora se raditi sa dvije troske. S druge strane, primjena kisika za obradu gvožđa ovakvog sastava ima za posljedicu porast temperature preko nivoa povoljnog i potrebnog za izljevanje čelika. Stoga u LD-procesu treba hladiti talinu krečnjakom, rudom ili raskovom. Hoće li se izabrati za hlađenje ruda ili raskov samo je pitanje troškova. Kad se hlađi rudom (sl. 43), reakcije Si, Mn i P protiču brže nego kad se hlađi raskovom. Sagrjevanje silicijuma tada se završava ranije, fosfor i mangan dostižu minimum sadržaja već u 5. odnosno 4. minuti, a u 12. minuti javlja se maksimum sadržaja mangana i fosfora izraženje nego kad se hlađi raskovom. Postoje i razlike u kretanju sastava troske u toku LD-procesa pri hlađenju rudom (sl. 44) i pri hlađenju raskovom.

Dezoksidacija LD-čelika najčešće je izlišna, ali je utoliko značajnija kontrola temperature taline. Kod LD-procesa nisu (kao kod Bessemerovog i Thomasovog) potrebne ni mјere za denitrifikaciju čelika, jer LD-čelik ne sadrži više od 0,002–0,004% azota, tako da je kvalitet LD-čelika ekvivalentan kvalitetu SM-čelika.

Kisično-mlazni pneumatski procesi za proizvodnju kvalitetnog čelika iz Thomasovog gvožđa. Kad bi se Thomasovo gvožđe i uopšte gvožđe sa visokim sadržajem fosfora preradilo LD-procesom, odvijao bi se proces metalurški na isti način kao u Thomasovom procesu. Najprije bi izgorio ugljik, pa onda fosfor, a finalni sadržaj željeza u troski bio bi relativno visok



Sl. 43. Sadržaj C, P, Mn i Si u zavisnosti od vremena u toku LD-procesa, uz hlađenje rudom



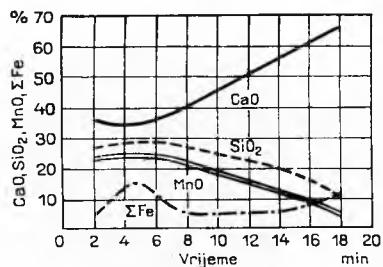
Sl. 42. LD-konverteri

jer troska i čelik u posljednjim minutama inače vrlo brzog LD-procesa više nisu u prisnom dodiru. Razvijeni su postupci kojima se obrće redoslijed izgaranja tako da prvo izgara i prelazi u trosku fosfor a izvjestan sadržaj ugljika se zadržava do kraja procesa, ili se na neki drugi način obezbjeđuje dobar kontakt troske i metala. U prvom slučaju ostvaruje se mogućnost da se, kao i u procesima SM i LD, talina finališe izabranim postotkom ugljika. S druge strane, čist kisik kao strujni gas obezbjeđuje, kao i u LD-procesu, nizak sadržaj azota. U ove procese spadaju proces LDAC i rotorski procesi »Kaldo« i »Oberhausen«. Metalurški su ovi procesi sinteza SM-peći (ali sa brzom rafinacijom) i konvertera, tj. procesa pri kojima se kupki ne dovodi toplotna energija izvana.

U procesu LDAC (Linz-DonaWitz-Arbed-Centre National) prioritet se oftosforavanja postiže ranim formiranjem i istapanjem troske na taj način što se skupa sa strujom kisika u kupku ubacuje i krečna prašina. Proces ima dva perioda: u prvom se sadržaj fosfora snizuje na $\sim 0,2\%$, a ugljika na $\sim 0,7\%$, nakon čega se troska, bogata fosforom ($\sim 20\% P_2O_5$) a siromašna željezom, odlije. Dodatkom raskova (i preko 30%), počinje drugi period, opet na bazi kisika i kreča. Ostaci fosfora i ugljika udaljuju se do potrebne mjeri djelovanjem srazmjerne male količine troske.

Rotorski proces »Kaldo«. Rotor »Kaldo« (Kalling-Domnarvet) okreće se u skoro horizontalnom položaju oko svoje osi brzinom do 30 obrtaja u minuti. Iz otvorenog čeonog zida rotora pušta se u nj struja čistog kisika, koji u slobodnom prostoru reaguje sa rasprskanim česticama metala i troske, tako da se vrlo rano formira tečna i reaktivna oftosforavajuća troska. Kad se postigne $\sim 0,3\%$ P, troska ($20\% P_2O_5$, do 5% Fe) se mijenja i proces okonča pod malom količinom troske. Raskov (za hlađenje, do 30%) i kreč dodaju se u početku procesa. Po toni troši se $80\cdots90\text{ Nm}^3$ kisika.

Rotorski proces »Oberhausen«. Za razliku od rotora »Kaldo«, u rotoru »Oberhausen« radi se sa dvije uzajamno nezavisne mlaznice kisika. Primarni kisik čistoće 95% uvodi se u kupku pomoću cijevi hladene vodom, pod pritiskom od 3,5 at, i služi za metalurške reakcije. Sekundarni kisik čistoće 75%, uveden drugom mlaznicom u rotor iznad kupke, posjećuje sekundarne reakcije i obezbjeđuje sagorijevanje produkata nastalih djelovanjem primarnog kisika.



Sl. 44. Kretanje sastava troske u toku LD-procesa uz hlađenje rudom

Broj obrtaja ovog rotora je malen ($0,1\cdots0,5\text{ min}^{-1}$), a dužina veća nego rotora »Kaldo«. Prerada taline od $60\cdots100\text{ t}$ traje oko 2 h.

Upoređenje procesa proizvodnje čelika. Visokokvalitetni i specijalni čelici proizvode se jednim od elektroprocesa (elektrolučnim ili induksijskim), dakle procesima koji iz ekonomskih razloga ne dolaze u obzir za proizvodnju masovnog čelika, izuzev u slučaju da je cijena električne energije vrlo niska i da je udio gvožđa u ulošku malen. Za proizvodnju masovnih čelika, izbor između klasično-pneumatskog procesa, SM i kisično-pneumatskog procesa zavisi prije svega od raspoloživosti metalnih sirovina (raskova i gvožđa), kvaliteta gvožđa (sa niskim ili sa visokim sadržajem fosfora) i kvaliteta čelika koji treba proizvesti. Pri tome treba imati u vidu da proizvodnja čelika u SM-peći sa plitkim ognjištem uz primjenu gasovitog kisika dopušta uložak i do 60% tečnog gvožđa; da različite varijante kisično-pneumatskih procesa omogućuju preradu gvožđa sa $0,1\cdots2,0\%$ fosfora u čelik koji je, naročito kad je vrlo mekan, ekvivalentan SM-čeliku, a jeftiniji je od njega; da u razdobljima kad je slaba konkurenca, a raskov je jeftin, ekonomsku prednost imaju SM-peći pred kisično-pneumatskim procesima, i obrnuto; da za

proizvodnju masovnih čelika iz visokofosfornog gvožđa u obzir dolazi Thomasov proces, za proizvodnju kvalitetnih čelika iz takvog gvožđa jedan od kisično-pneumatskih procesa, a samo izuzetno SM-proces sa 30…50% gvožđa u ulošku; da za meke masovne čelike iz fosforom siromašnog gvožđa dolazi u obzir proces LD, a za kvalitetne vrste čelika iz istog gvožđa dolazi u obzir SM-proces sa 30…50% gvožđa.

Uzimajući kao osnovu poređenja fiksnu Siemens-Martinovu peć, niskofosforno gvožđe, odnos gvožđa i raskova 70 : 30, rudo sa 55% Fe i utrošak od 1,5 t normalnog koksa po 1 t čelika, investicije po toni čelika integrisane željezare kapaciteta 3 Mt manje su za kisično-pneumatsku čeličanu nego za SM-čeličanu, i to direktnе investicije za 46…50%, a ukupne (direktnе i indirektnе) za $\sim 20\%$. I proizvodni troškovi pneumatskog procesa niži su od proizvodnih troškova SM-procesa za 5…10%.

H. Numić

LIVENJE ČELIKA ZA PRERADU

Kada je u okviru jednog od navedenih postupaka metalurški proces izrade čelika završen, tečni metal puni se u posebnu posudu — kazan, a zatim izljeva u kalupe gdje se stvrdnjava, poprimajući oblik kalupa. Ova faza, koja počinje izljevanjem iz proizvodnog agregata a završava stvrdnjavanjem u kalupu, naziva se *livenje*. Ukoliko postoji namjera da se čelik nakon stvrdnjavanja podvrgne daljoj preradi gnječenjem (valjanjem, kovanjem itd.), čelik se izljeva u specijalne kalupe od livenog gvožđa zvane *kokile*, a dobiveni proizvod se naziva *ingotom* (franc. *lingot*, njem. *Gussblock*, engl. *ingot*, rus. *слиток*). U tom slučaju livenje predstavlja jednu medufazu u ukupnom procesu proizvodnje čelika. Proizvodi definitivnog oblika koji se dobivaju livenjem, a ne podvrgavaju se daljim procesima gnječenja, nazivaju se zajedničkim imenom *čelični liv* i njihova proizvodnja spada u oblast li-varstva (v. *Livenje*). U ovom poglavljiju tretira se jedino livenje u okviru procesa proizvodnje čelika, tj. livenje ingota.

Tok procesa livenja. Proces livenja predstavlja jednu od najosjetljivijih fazu u proizvodnji čelika. Sve operacije u tom procesu moraju biti izvršene dok je čelik u tečnom stanju i prije nego što počne kristalizacija, što znači da je vrijeme veoma ograničeno, jer se toplota brzo gubi. Da bi se manipulisao tečnim metalom odvijalo bez smetnji, moraju se pravovremeno izvršiti sve potrebne pripreme.

Posuda koja prima tečni čelik iz proizvodnog agregata (konvertera, SM-peći, elektro-peći i sl.) naziva se *odlivni kazan*. Kapacitet tog kazana kreće se od nekoliko stotina kilograma do $\sim 250\text{ t}$. Najveći kazani se upotrebljavaju u SM-čeličanama. U slučajevima kad je količina taline veća od 250 t, tečni čelik se lije u dva kazana da bi se izbjegle dizalice velikih dimenzija. Kazani se izrađuju od čeličnog lima i oblažu vatrostalnom oblogom, i to bilo zidanjem opeka specijalnog formata bilo nabijanjem vatrostalnim masama. Osnovni vatrostalni materijal je šamot. Za oblaganje kazana zidanjem troši se $5\cdots8\text{ kg šamotnih opeka po toni čelika}$. Nakon svakog zidanja treba zidte temeljito osušiti. Kazan je snabdjeven specijalnim uređajem za livenje (sl. 45) koji omogućuje da se pri izljevanju kroz otvor na dnu brzina isticanja (tzv. brzina livenja, izražena u t/min) regulira dizanjem čepa *I* iz njegovog ležišta pomoću sistema poluga. Čepna poluga *2* obložena je šamotnim cijevima, a na kraju je pričvršćen čep koji mora biti vrlo otporan prema trošenju strujom tečnog čelika. Materijal čepa je visokokvalitetni šamot, magnezit, grafit i sl. U dnu kazana ugrađen je izljevni kamen *3* u koji se stavlja izljevnik. Izljevnik je od sličnog materijala kao čep. Promjer izljevnika iznosi $30\cdots70\text{ mm}$, zavisno od kapaciteta kazana, vrste čelika, načina livenja, veličine ingota i sl. Za svako livenje priprema se nova obloga čepne motke, novi čep i novi izljevnik.

Kokile su kalupi od livenog gvožđa u koje se lije tečni čelik. Čelik poprima oblik šupljine kokile i nakon stvrdnjavanja predstavlja ingot. Oblik i dimenzije ingota zavise od načina njegove dalje prerade. Prema obliku ingoti se klasificiraju ovako:

Oblik presjeka	Naziv odlijevka	Svrha upotrebe	Težina, t
kvadratni	kvadratni ingot	valjanje profila	do 10
pravougaoni	brama	valjanje limova	do 30
polygonalni	polygonalni ingot	kovanje	do 300

Pored ovih najčešćih oblika postoji i niz specijalnih, kao npr. okrugli ingot za proizvodnju bešavnih cijevi, kruškasti ingot za

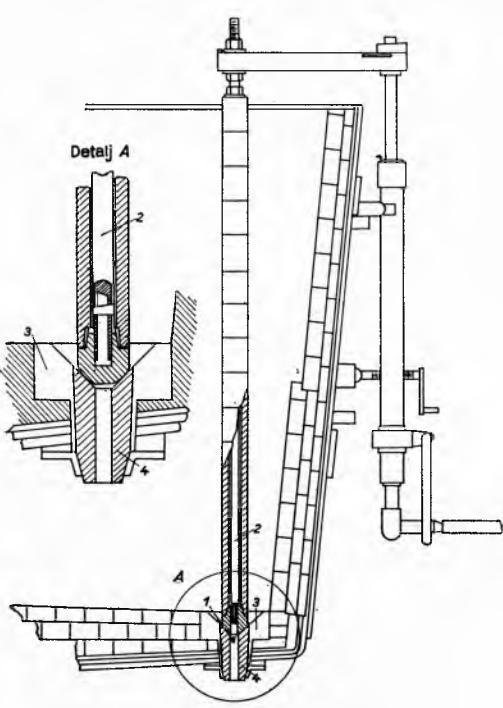
proizvodnju bandaža i točkova itd. Osnovni geometrijski oblik ingota, tj. šupljine kokile, jest krnja piramida. Ako je manja osnovica okrenuta gore, kokila se naziva »normalno konična«; ako je ta osnovica okrenuta dolje, kokila se zove »obrnuto konična«. Konicitet je potreban da se ingot lako izvuče iz kokile. Izvlačenje stvrdnutog ingota iz kokile naziva se *stripovanje* (od engleskog *to strip*). Normalno konični ingoti se stripuju tako da se kokila sa ingotom podigne prema gore, a obrnuto konični ingoti izvlače se iz kokile prema gore.

Postoji velik broj varijacija u oblicima kokila, ali se one mogu svesti na nekoliko tipičnih (sl. 46). Oblikovanje unutarnjih zidova, iz čega rezultira oblik strana ingota, ima za cilj da utiče na kristalizaciju i da spriveći razne kvalitetne nedostatke. To predstavlja predmet posebne discipline: konstruisanja kokila i ingota.

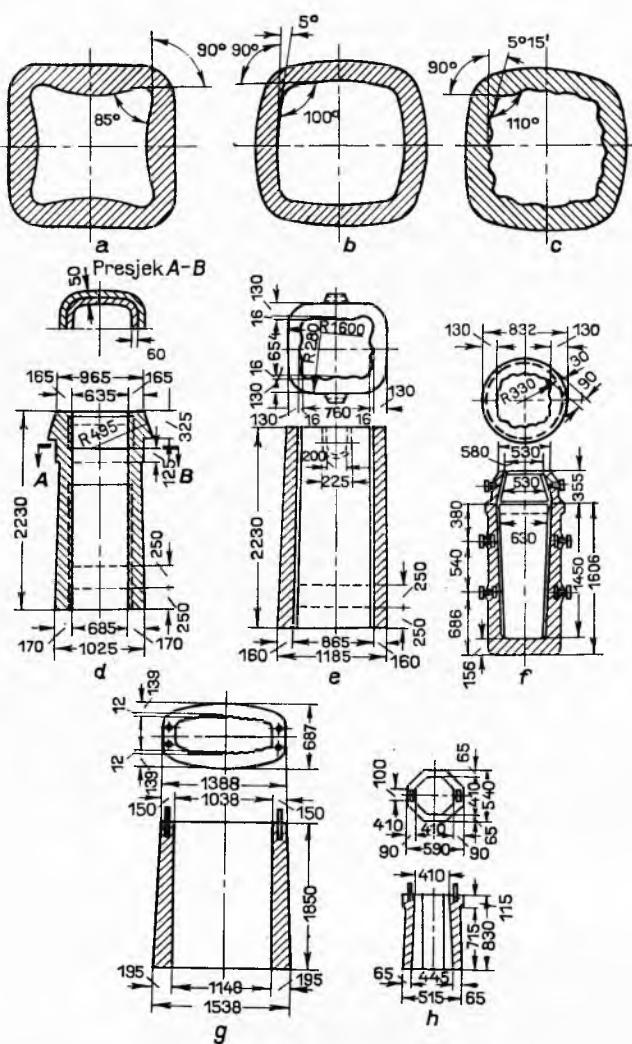
Težina kokile po pravilu približno je jednaka težini ingota, ali kokile mogu biti i znatno teže. Kokile predstavljaju znatnu stavku u troškovima proizvodnje i njihova potrošnja se kreće od 5 do 24 kg po toni čelika, zavisno od kvaliteta i uslova eksploatacije. Osnovni materijal za izradu kokila je »kokilni live« tipične analize: 3,4...3,8% C; 1,4...2,0% Si; 0,5...0,8% Mn; 0,04...0,06% P; 0,04...0,06% S. Kokile zahtijevaju posebnu njegu, čišćenje, lakiranje, umjerenu frekvenciju upotrebe, pravovremeno stripovanje (da se ne pregriju) itd.

Za livenje čelika iz kazana u kokile postoje dva postupka: livenje »odozgo« i livenje »odozdo«. Pod livenjem »odozgo« razumjeva se punjenje kokile direktno iz kazana i po pravilu se upotrebljava za veće dimenzije ingota (obično iznad 3000 kg). Nedostatak mu je da su operacije komplikovanije jer se izljevnik kazana mora dovesti iznad svake kokile i svaki put se mora zatvarati čepom. Brzine livenja su veće (do 3 t/min), a površina ingota lošija uslijed zapljuškivanja zidova kapljicama koje nastaju razbijanjem mlaza u dnu kokile. Stoga se upotrebljavaju različita pomoćna sredstva, kao npr. dodavanje pilotine u kokilu, livenje kroz kartonsku cijev, i sl.

Livenje »odozdo« osniva se na principu komunicirajućih su-dova; dna kokila povezana su kanalima ugrađenim u ploču na kojoj su kokile postavljene (livnu ploču, sl. 47). Čelik se lije iz kazana u lijevak, odakle sistemom kanala dospijeva u kokile i penje se uslijed ferostatičkog pritiska istovremeno u svim koki-lama koje se nalaze na jednoj ploči. Broj kokila na jednoj ploči varira zavisno od dimenzije ingota i može biti od jedan do više desetaka. U lijevak i kanale se umeću šamotne cijevi kroz koje struji metal, a koje se mijenjaju za svako livenje. Prednosti ovoga postupka jesu što se dobiva dobra površina ingota i što se kazan mora rijede zatvarati čepom, ali su nedostaci što se čelik zagadi



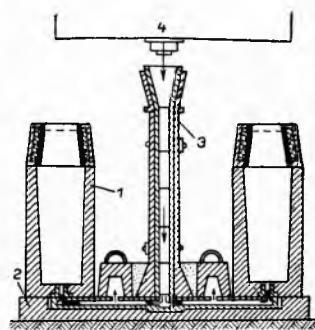
Sl. 45. Detalji livnog kazana



Sl. 46. Primjeri oblika i dimenzija kokila. Kokile d i f imaju izolirani nastavak za izgubljenu glavu

šamtom erodiranim iz lijevka i kanala, i što su temperaturni odnosi anomalni jer se na vrhu ingota nalazi najhladniji metal. Livenje »odozdo« je neophodno kad su dimenzije ingota manje, jer se kroz jedan lijevak istovremeno odlje veći broj ingota i tako proces svodi u razumne vremenske granice.

Radi konzervacije toploće ingoti se stripaju, tj. vade iz kokile, što prije, dok je unutarnji dio ingota još u tečnom ili tjestovitom stanju. Ingoti se stoga transportuju u uspravnom položaju specijalnim dizalicama ili drugim sredstvima na dalju prerađbu (tj. većinom u peći valjaonica, kovačnica itd.). U posebnim slučajevima se ingoti i potpuno hlađe, a po potrebi i kontrolisanom brzinom (specijalni čelici).



Sl. 47. Postava za livenje »odozdo«.
1 Kokila, 2 livna ploča, 3 lijevak,
4 kazan

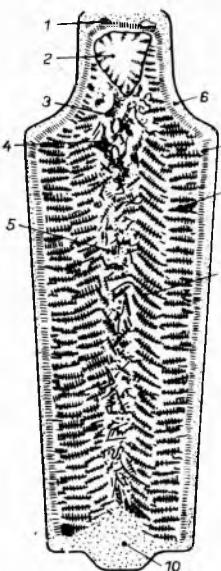
hladi, tako da kristalizacija površinskih slojeva počinje prije nego što je livenje završeno. Nastali stvrdnuti sloj se nakon završenog livenja širi prema centralnoj zoni, pri čemu teorijski brzina stvrdnjavanja prema Fieldu iznosi $D = K \sqrt{t}$, gdje je D debljina stvrdnutog sloja, t vrijeme stvrdnjavanja, a K koeficijent koji se kreće od 23 do 30, zavisno od uslova stvrdnjavanja (oblika ingota, njegove mase itd.), ako je D u milimetrima a t u minutama.

Kristalizacija ingota se principijelno odvija u tri faze iz kojih rezultiraju karakteristični oblici i konfiguracija kristala. U prvoj fazi nastaje naglo hlađenje površinskog sloja uslijed predaje topote zidovima kokile. Tu se formira zona sitnih kristala globularnoga oblika. Na ovu se nadovezuje zona stubastih kristala (»transkristala«) orijentisanih pod pravim uglom na zidove kokile. Stubasti kristali formiraju se kada se uspostavi ravnotežno stanje u prelazu topote iz unutarnjih zona ingota na zidove kokile i zatim na okolinu. Uslijed kontrakcije ingota u toku ovoga procesa nastaje u jednom momentu zazor između zidova ingota i zidova kokile, tako da nastali sloj vazduha usporava hlađenje. Kad preostali dio tečnog metala dostigne temperaturu kristalizacije, u svim se njegovim djelovima formiraju centri kristalizacije (»klice«) koji u toku daljeg rasta formiraju centralnu zonu raznoliko orijentisanih kristala manje ili više globularnoga oblika. Ovo predstavlja treću fazu. Zahvaljujući ovakvom mehanizmu nastaje raspored kristala kako je shematski prikazan na sl. 48. Posebna oblast globularnih kristala na dnu ingota pripisuje se djelovanju podne ploče i djelomičnom taloženju iz gornjih slojeva u posljednjoj fazi stvrdnjavanja.

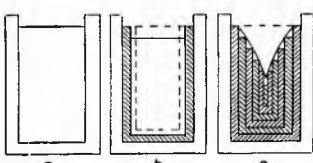
Pri prelazu u čvrsto stanje naglo se povećava specifična težina čelika uslijed kontrakcije volumena (»krčenja«). Kako se stvrdnjavanje odvija od površinskih slojeva presjeka ka centru, dolazi do slijeganja gornje površine ingota (sl. 49) pa nastaje ljevkasta šupljina, tzv. *lunker* (njem. *Lunker*, engl. *pipe*). Zavisno od uslova stvrdnjavanja, lunker može da se proteže, bilo kontinuirano bilo diskontinuirano, i vrlo duboko u tijelo ingota; on u svakom slučaju predstavlja defekt zbog kojega se veći ili manji dio izlivenog ingota mora odbaciti kao neupotrebljiv. Da se ograniči rasprostiranje lunkera (da lunker bude

što pliči) gornji dio kokile se izolira ili se doda posebni izolirani nastavak (sl. 50), čime se usporava stvrdnjavanje gornjeg dijela. Na taj način tečni metal popunjava kontraktione šupljine u tijelu ingota i lunker se ograničava na gornji dio koji se u toku dalje prerade odsječe (»izgubljena glava«). Dodatno se površina metala pokriva raznim smjesama koje snižavaju tačku topljenja ili razvijaju dodatnu topotu (»lunkeritma«), sve radi toga da metal u gornjem dijelu ostane što duže u tečnom stanju. Pri optimalnim uslovima može se iskoristiti preko 90% mase ingota.

Kristalizacija leture se odvija po

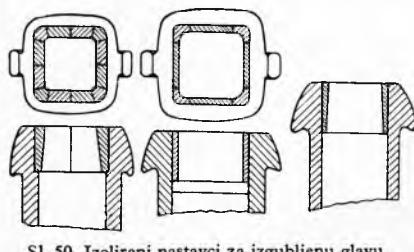


Sl. 48. Shema kristalne konfiguracije ingota. 1 Metalna kora, 2 lunker, 3 i 4 porozna i onečišćena mjesto u zoni lunkera, 5 centralna zona, 6 sitni kristali pri površini, 7 i 8 transkristalizaciona zona, 9 zakošeni transkristali, 10 globularna zona pri dnu



Sl. 49. Shema postanka lunkera. a) Zapremina tečnog čelika, b) slijeganje površine tečnosti pri stvrdnjavanju, c) dokraj stvrdnuti ingot

što pliči) gornji dio kokile se izolira ili se doda posebni izolirani nastavak (sl. 50), čime se usporava stvrdnjavanje gornjeg dijela. Na taj način tečni metal popunjava kontraktione šupljine u tijelu ingota i lunker se ograničava na gornji dio koji se u toku dalje prerade odsječe (»izgubljena glava«). Dodatno se površina metala pokriva raznim smjesama koje snižavaju tačku topljenja ili razvijaju dodatnu topotu (»lunkeritma«), sve radi toga da metal u gornjem dijelu ostane što duže u tečnom stanju. Pri optimalnim uslovima može se iskoristiti preko 90% mase ingota.



Sl. 50. Izolirani nastavci za izgubljenu glavu

fizičko-kemijskim zakonima rastvorâ, pri čemu osnovu predstavlja različita rastvorljivost komponenta u pojedinim fazama. Legure, kao mješavine više komponenata, nemaju strogo određenu tačku kristalizacije, nego se kristalizacija proteže kroz određeni temperaturni interval ograničen tačkama početka i kraja kristalizacije. Tako npr. u binarnom sistemu Fe-C, a u području δ-željeza (sl. 51), pri kristalizaciji legure sastava B' prvo se izlučuju kristali sastava H' čiji se sastav kreće duž linije $T-H'$ (solidusa) dok se sastav tečne faze mijenja duž linije $B'-B$ (likvidusa). Ovo diferenciranje hemijskog sastava pri prelazu iz tečnog u čvrsto stanje naziva se *segregacija* (cijedeće, njem. *Seigerung*). Zbog sličnosti trouglova je odnos

$$TH : TB = T'H' : T'B' = \text{konst.} = K,$$

tj. odnos je sadržaja C u čvrsto i tečnoj fazi konstantan, pri čemu K predstavlja konstantu distribucije. Što je K manji to je tendencija za segregaciju veća. Vrijednosti K za najvažnije elemente rastvorene u željezu jesu prema Chipmanu ove:

Element	C	Mn	Si	P	S	O	Cu
K	0,13	0,84	0,66	0,13	0,05	0,10	0,56

Uslijed kristalne segregacije pri stvrdnjavanju ingota nastaje razlika između hemijskog sastava površine i sredine presjeka, dna i vrha ingota. Ta pojava naziva se *blokovska segregacija*. Što stvrdnjavanje duže traje to su i segregacije jače, tako da njihov intenzitet raste s temperaturom i brzinom livenja i s dimenzijama ingota.

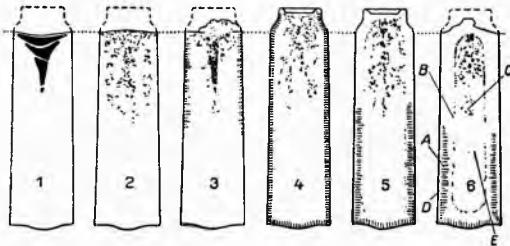
Na osnovu ponašanja rastopa za vrijeme livenja razlikuju se dvije vrste čelika: *umiren* i *neumiren*. Neumiren čelik pri livenju i stvrdnjavanju pokazuje kretanje koje podsjeća na ključanje tečnosti i naziva se »kuhanje«; kod umirenega čelika ove pojave nema. Razlog je za ovakvo ponašanje način dezoksidacije. Ako je poslije dezoksidacije u čeliku zaostalo još dovoljno rastvorenog kisika da se pri hlađenju, uslijed promjene uslova ravnoteže, nastavi odvijanje reakcije:



čiji je proizvod plinoviti CO, ovaj formira mjehuriće koji, napuštajući tečni metal, izazivaju kretanje za koje se kaže da »čelik kuha«. To je mahom slučaj kad se dezoksidacija vrši samo pomoću mangana. Ako je pak rastvoren kisik u tolikoj mjeri vezan dezoksidacionim sredstvima (Si, Al, Ti) da ne može da dode do navedene reakcije, čelik je »umiren«. Zavisno od količine zaostalog kisika koji stoji na raspoloženju za navedenu reakciju, akcija »kuhanja« ima i različit intenzitet, tako da između ekstremnih slučajeva, umirenega čelika i neumirenega čelika koji burno kuha, postoji prelaz preko čelikâ koji se zove polumiren. Niz karakterističnih uzdužnih presjeka ingota koji su pri kristalizaciji kuhalni prikazan je na sl. 52. Slučaj 1 predstavlja potpuno umiren ingot sa normalno razvijenim lunkerom. Slučaj 6 predstavlja tipičan neumeren ingot s brojnim šupljinama od zaostalih plinova koji za vrijeme kristalizacije nisu mogli da izidu nego su ostali »zamrznuti«. Te se šupljine nazivaju *plinski mjehurići* (njem. *Gasblasen*, engl. *blow holes*). U neumirenom čeliku ti mjehurići imaju karakterističan oblik i raspored. U donjem dijelu ingota postoji sloj izduženih mjehurića (A), tzv. »spoljašnji vijenac« plinskih mjehurića. On se formira za vrijeme kuhanja ingota. Sa B označen je »unutarnji vijenac«, koji se obrazuje u momentu kada se na gornjoj površini ingota stvara kora, tako da prestane kuhanje. Sa C označeni su nepravilno raspoređeni mjehurići globularnoga oblika u centralnoj zoni, nastali u toku kristalizacije pošto je prestala akcija kuhanja, odnosno mogućnost oslobođavanja plinova iz tijela ingota. Zdravi sloj čelika koji je neposredno ispod površine (D) zove se »kora«, a centralna zona (E) zove se »jezgro«. Neumiren ingot nema lunkera jer pritisak plinova kompenzira kontrakciju pa je

volumen lunkera raspodijeljen na veliki broj plinskih mjeđuhrića. Budući da unutarnji zidovi ovih šupljina nisu oksidirani, oni se prilikom dalje prerade gnječenjem zavare pa nisu štetni. Uslijed činjenice da ne postoji lunker, masa ingota neumirenog čelika bolje se iskoristi nego umirenog, pa se može postići izvadak i iznad 90%.

Dovoljna debljina kore osnovni je preduslov za uspješnu preradu neumirenih ingota. Ako kora nije dovoljno debela, tako da uslijed njene oksidacije za vrijeme zagrijavanja ingota spolažnji vjenac mjeđuhrića dospije na površinu, mjeđuhrići se oksidiraju i daju ispučalu površinu gotovih produkata. Debljina kore proizlazi iz prirode procesa kuhanja, a to znači iz termodynamičkih uslova za odvijanje oksidacije ugljika pri stvrdnjavanju. Tu imaju važne uloge koncentracije ugljika, kisika i mangana, rezidualni silicijum, eventualno dodati aluminijum, temperatura i brzina livenja i dimenzije ingota. Iz svih ovih okolnosti proizlaze i varijante polumirenih ingota označene sa 2-5 na sl. 52.



Sl. 52. Presjeci ingota s različitim stepenom dezoksidacije. 1 Potpuno umiren ingot, 2, 3 polumireni ingoti, 4, 5, 6 neumireni ingoti sa različitim stepenom iskuhavanja. Ingots 6 ima najpovoljniju strukturu: A spoljni vjenac mjeđuhrića, B unutarnji vjenac mjeđuhrića, C mjeđuhriči u „jezgru“, D „kora“, E „jezgro“.

Neumireni ingoti imaju veoma jake segregacije u jezgru pa su neupotrebljivi za sve one svrhe gdje uslovi prerade iziskuju da masa jezgra dode na površinu produkta (raskivanje i sl.) i gdje se zahtijeva da jezgro bude vrlo duktorno, a preradom se jezgro dovoljno ne prognjeći. Ove segregacije nastaju uslijed simultanog djelovanja kristalnih segregacija i mehaničkog kretanja tečne faze u kojoj se pri kristalizaciji nagomilavaju nečistoće. Segregacije su to jače što je kora debla, tako da su uvjeti za dobar kvalitet površine i za dobar kvalitet jezgra jedni drugima suprotni. Izlaz je u djelomičnom ili potpunom umirivanju zavisno od svrhe upotrebe. Prednosti su neumirenog čelika što se ingot bolje iskorištava i bolje obraduje u toplom, a izvjesne prednosti ima i kod hladne obrade i zavarivanja. Nedostatak je manja homogenost, pa je potreban visok stepen gnječenja. Neumireni čelik upotrebljava se za valjane proizvode kao što su limovi, profili, žica i sl., koji se proizvode uz visok stepen gnječenja.

Greške. Svi diskontinuiteti u masi materijala koji negativno utiču na njegovu preradu ili primjenu smatraju se greškama. Jedan dio tih diskontinuiteta proizlazi iz prirode samog procesa, drugi nastaju uslijed različnih manjkavosti tehnologije. Onaj dio diskontinuiteta koji je prirodna posljedica procesa smatra se greškom ako prevazilazi intenzitet koji se ne može izbjegći. Koliki je taj dozvoljeni intenzitet to je predmet stalnog izučavanja; on je uslovjen i svrhom upotrebe i zahtjevima ekonomičnosti proizvodnje.

Greške se dijele na površinske, koje su ograničene na površinu ingota, i na unutarnje, koje se pojavljuju u tijelu ingota. Površinske greške su pukotine, hravavosti i ljske raznih oblika, gniazda nemetalnih supstancija (troske, vatrostalnog materijala), otvoreni plinski mjeđuhrići itd. One se suzbijaju njegom kokila, lakanjem unutarnjih zidova kokila, odmjeravanjem brzine livenja i livnog sistema itd. Ukoliko se ipak pojave, ingot se od njih „čisti“ plamenom (ručno ili automatski) ili mehaničkim sredstvima, i to ili prije, ili za vrijeme, ili poslije tople prerade. Pri tom se uvijek radi o odstranjivanju sloja sa defektognim mjestima, pri čemu se u toku dalje prerade taj dio površine ingota zagladi tako da ne ostaju nikakvi tragovi.

Unutarnjih grešaka postoji više vrsta. Ukoliko zona transkristalizacije i zona segregacija prelazi neizbjegni obim, to se smatra greškom. Obično je posljedica nepravilnog režima livenja,

u prvom redu pogrešne brzine i temperature livenja. Pored ovoga se u ingotima pojavljuju mesta s nemetalnim supstancijama, koja se skupnim imenom nazivaju *nemetalni uključci*. Nemetalni uključci prema svome izvoru postanka mogu biti dvojaci: endogeni i egzogeni. Endogeni nastaju kao produkti reakcija među komponentama rastvorenim u čeliku; uglavnom su to oksidi željeza, mangana, silicijuma, aluminijuma, kroma itd. ili njihovi kompleksi nastali prilikom dezoksidacije, i sulfidi željeza i mangana. Svi ti uključci nisu imali mogućnost da isplivaju iz tečnog metala prije kristalizacije. Na temperaturi tečnog čelika oni mogu biti bilo u tečnom bilo u čvrstom stanju. U prvom slučaju lakše koaguliraju i isplivaju pa se stoga nastoji da dezoksidacija daje tečne produkte (kompleksi više oksida i sl.). Posbno teško se odvaja aluminijum-oksidi. Veličina ovih uključaka može biti različita, počevši od submikroskopskih i mikroskopskih dimenzija pa do dimenzija vidljivih golim okom. Raspored uključaka u tijelu ingota mahom je nepravilan, ali uslijed potiska postoji tendencija nagomilavanja u gornjem dijelu jezgra. Egzogeni uključci su mehaničke primjese troske ili erodiranog vatrostalnog materijala s kojim čelik pri livenju dolazi u doticaj. Oni su mahom grubi, vidljivi prostim okom i potpuno slučajno raspoređeni.

Količina nemetalnih uključaka tolerirati zavisi od svrhe upotrebe. Nagomilavanje oksida i sulfida željeza po granicama primarnih kristala može da izazove teškoće pri toploj preradi time što se čelik raspada (*crveni lom, bijeli lom*). To se može kompenzirati blagotvornim uticajem mangana.

Svaki čelik sadrži endogenih ili egzogenih uključaka u manjoj ili većoj količini. Količina endogenih uključaka zavisi od načina vođenja procesa oksidacije i dezoksidacije i od sadržaja sumpora, količina egzogenih od kvalitete vatrostalnog materijala i efikasnosti kontrole proizvodnje. Postoji više metoda za određivanje uključaka: mikroskopska ispitivanja, brojanje i poređenje sa etalonima (Jernkontoret, Diergarten, ASTM, i sl.), detekcija fizikalnim metodama (magnetofluks, ultrazvuk, rendgen, radiografija), različite tehnološke probe (makronagrizanje, plavi lom itd.), a u novije vrijeme izolaciona analiza i egzaktne metode identifikacije izolata (mikroanaliza, rendgenska strukturalna analiza i spektralna analiza).

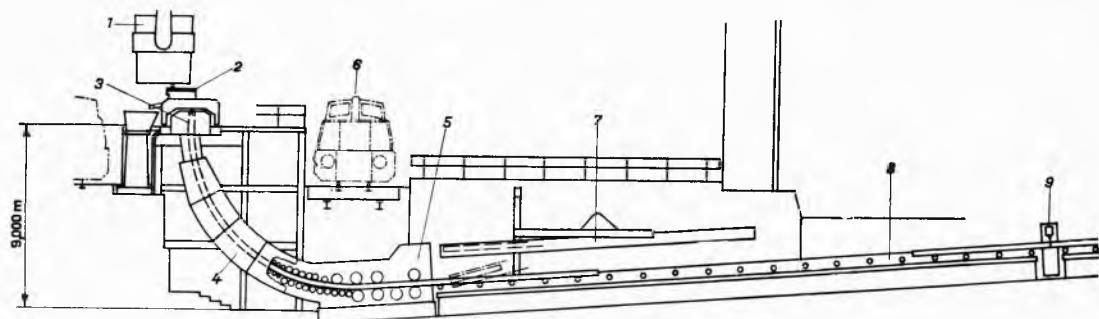
Značajni izvor grešaka ingota jesu plinovi rastvoreni u tečnom čeliku: kisik, vodik i azot. Naročito vodik može biti uzrok grešaka u ingotima. Budući da rastvorljivost vodika skokovito pada pri prelazu u čvrsto stanje, te se dalje smanjuje pri hlađenju, nastaje jaka tendencija ka izlučivanju. Onaj dio koji se izlučuje pri kristalizaciji može da izazove pojavu plinskih mjeđuhrića i u umirjenom čeliku. Dio pak koji ostane u čvrstom rastvoru izaziva unutarnja naponska stanja koja mogu dovesti do pukotina unutar tijela ingota ili do pukotina pri toploj preradi. Prema najnovijim shvaćanjima smatra se da ove pukotine nastaju nagomilavanjem molekularnog vodika koji se obrazuje kada nastaju smetnje u difuziji atomarnog vodika kroz čvrstu fazu. Povod mogu biti nemetalni uključci, jače segregacije i sl. Ove pukotine se nazivaju *pahuljicama*. One su opasnije kad nastanu u gotovim proizvodima jer se u ingotima mogu i zavariti u toku dalje tople prerade. Pored ovih grešaka mogu se pojaviti unutar ingota porozna mjesta i šupljine različitih oblika i različitog pravca rasprostiranja. Jedan je od čestih razloga takvih šupljinama nedovoljna lokalizacija lunkera, tako da se on, često diskontinuirano, proteže kroz tijelo ingota. Pored toga mogu u meduprostorima stubastih kristala nastati poroznosti zbog pomanjkanja tečne faze pri kristalizaciji. Sve ove greške se jednim dijelom odstrane gnječenjem pri preradi, ali neke mogu biti razlog da se gotov čelični proizvod mora odbaciti ili da on u eksplotaciji podbací.

Specijalni postupci livenja. Otkad su upoznati brojni razlozi koji u procesu livenja i kristalizacije izazivaju pojavu grešaka, nisu prestala nastojanja da se uvedu postupci koji će omogućiti bolji kvalitet ingota. Tu spadaju različite konstrukcije kokila, livenje pod pritiskom, livenje u neutralnim atmosferama (npr. argona), različiti postupci vještačkog zagrijavanja glava ingota, livenje sa meduposudom itd. Od svih ovih postupaka izdvajaju se dva koji su se afirmirali i karakterišu savremenim razvojem tehnologije livenja. To su postupci livenja u vakuumu i postupci kontinuiranoga livenja.

Tretiranje tečnog čelika vakuumom do 1 mm Hg ima niz prednosti. U prvom redu radikalno smanjuje sadržaj plinova. Smanje-

njem sadržaja kisika može se znatno smanjiti broj oksidnih uključaka i povećati čistoća čelika, a smanjenjem sadržaja vodika smanjuju se unutarnji naponi i pojava pahuljica. Po- red toga vakuumom se mogu iz čelika djelomično ukloniti primjese čiji je parcijalni pritisak pare viši, a koje se oksidacijom ne daju udaljiti (Cu, Sb, As i dr.). Ako se tretiranje vakuumom kombinuje sa dezoksidacijom, i to tako da se tek nakon primjene vakuma dodaje silicijum i aluminijum, može se postići veoma visok stepen čistoće s obzirom na nemetalne uključke. Degazacijom neumirjenog čelika postiže se homogeniji ingot s manjim stepenom segregacije u jezuru itd.

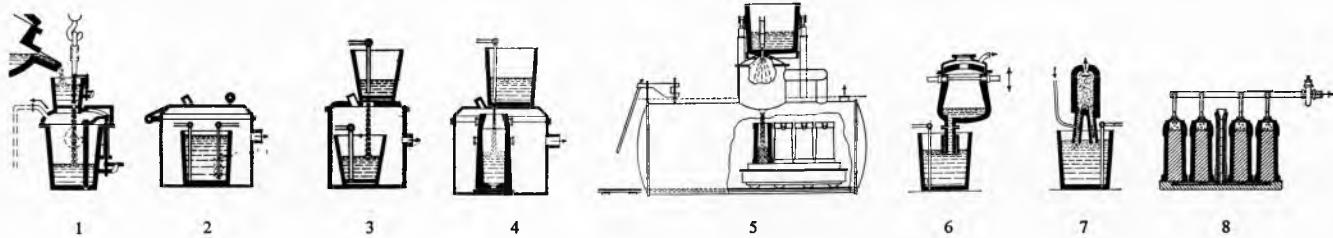
Princip tretiranja tečnog čelika u vakuumu sastoji se u tome da se tečni čelik dovodi u recipijent specifične izvedbe iz kojega se putem jakih pumpnih agregata (ranije s pomoću klipne pumpe, a danas češće s pomoću parnog ejektor-a) evakuiraju plinovi. Kapacitet pumpnog agregata obično je takav da se za nekoliko minuta postigne vakuum od $2\text{--}5 \text{ mm Hg}$. Na sl. 53 prikazane su varijante tog postupka. Varijanta 1 predstavlja evakuiranje mlaza



Sl. 55. Shema kontinuiranog livenja čelika sa zatrivenjem izvodom. 1 Kazan, 2 meduposuda, 3 kokila, 4 naknadno hlađenje, 5 valjci za pokretanje i upravljanje, 6 kolosijek, 7 dizalica za podizanje hladne trake koja na početku livenja obrazuje dno kokile i u toku livenja izvlači traku izlivenog čelika, 8 kotrljača, 9 autogeni sjekac

Evakuiranjem se postiže sadržaj vodika $\sim 1,6 \text{ Ncm}^3/100 \text{ g}$, pri čemu treba imati u vidu da opasnost od pukotina počinje ako koncentracija vodika pređe $3 \text{ Ncm}^3/100 \text{ g}$. Sadržaj kisika se može smanjiti za $20\text{--}80\%$, zavisno od vrste čelika odnosno od početne koncentracije. Sadržaj azota, zavisno od početne koncentracije, može se smanjiti do 40%. Sve ovo poboljšava homogenost čelika i njegove mehaničke i druge osobine.

Za razliku od kontinuiranog livenja aluminijuma, bakra itd., postupak kontinuiranog livenja čelika razvio se dosta kasno, jer je trebalo riješiti veliki broj posebnih problema. Teškoće proizlaze iz toga što je za livenje čelika potrebna viša temperatura i što čelik ima niži koeficijent provodljivosti topline, pa je hlađenje u kristalizatoru sporije. Postupak je razvijen do dovoljnog stepena



Sl. 53. Postupci evakuiranja tečnog čelika (v. tekst)

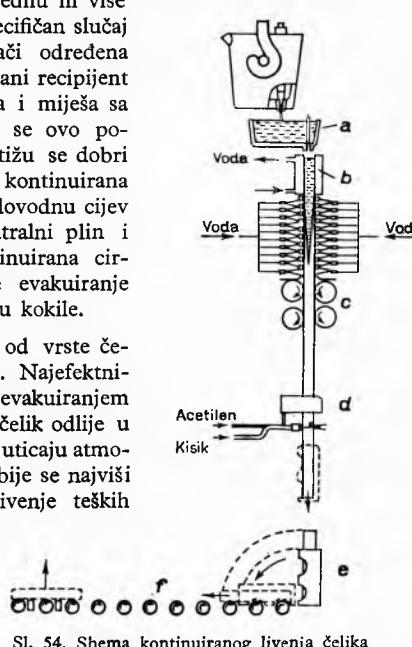
pri livenju u kazan kroz meduposudu smještenu neposredno pod izljevni žlijeb peći. Varijanta 2 predstavlja evakuiranje čelika u kazanu dodavanjem neutralnog plina (argona) koji izaziva takvo kretanje da i u donjim slojevima tečnosti nastane niski pritisak. Varijanta 3 slična je varijanti 1 ali se uredaj za nju može postaviti na bilo koje mjesto u čeličani. Varijante 4 i 5 predstavljaju evakuiranje pri livenju u jednu ili više kokila. Varijanta 6 je specifičan slučaj gdje se iz kazana izvlači određena količina čelika u evakuirani recipijent te nakon tretiranja vraća i mijesha sa preostalim čelikom. Ako se ovo ponovi nekoliko puta, postižu se dobri rezultati. Varijanta 7 je kontinuirana provedba varijante 6: u dovodnu cijev recipijenta uvodi se neutralni plin i time se obezbjeduje kontinuirana cirkulacija. Postupak 8 je evakuiranje nakon završenog livenja u kokile.

Izbor varijanti zavisi od vrste čelika i željenog rezultata. Najefektniji rezultati se postižu evakuiranjem mlaza. Ako se uz to i čelik odlije u kokilu a da se ne izloži uticaju atmosfere (postupci 4 i 5), dobije se najviši stepen degazacije. Za livenje teških ingota za kovanje, od kojih se zahtijeva najviši kvalitet, upotrebljavaju se stoga obično ti postupci.

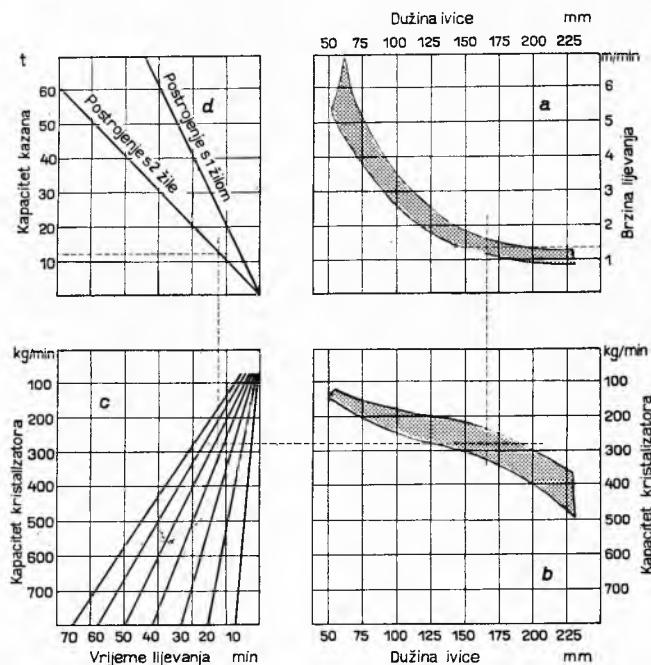
pogonske sigurnosti u posljednjih desetak godina i to unosi kvalitativno nove momente u proces proizvodnje čelika i konfiguraciju proizvodnih postrojenja željezara.

Principijelna shema procesa je prikazana na slici 54. Da bi dotok bio konstantan, čelik se lije iz kazana u meduposudu *a* iz koje kroz odgovarajući izljevnik dospijeva u kristalizator *b*. Ovaj se sastoji od bakarne kokile čiji su zidovi intenzivno hlađeni vodom pod pritiskom $5\text{--}6 \text{ at}$. Dužina kristalizatora se kreće od 300 do 2000 mm (izgleda da optimum leži između 500 i 700 mm). Presjek otvora kristalizatora odgovara željenom profilu čelika. Uobičajeni su kvadrat i pravougaonik (odgovarajući valjanim polufabrikatima, blumovima ili slabovima); pravougaonik je povoljniji zbog veće površine za hlađenje u odnosu na masu presjeka. U kristalizatoru se samo stvrdne kora a jezgro ostaje tečno. Ispod kristalizatora čelik se polijeva mlazovima vode i time se završava kristalizacija cijele mase. S pomoću valjaka *c* kontinuirano se izvlači čelik naniže, a onda se siječe autogenim sjekacem *d* koji se za vrijeme sjećenja kreće zajedno sa čeličnom trakom. Odrezani blum (ili slab) dospijeva u prevrtac *e* i iz ovoga na kotrljače *f*. U novije vrijeme uobičajeno je savijanje čelika prije rezanja (sl. 55), čime se olakšava manipulacija i povećava produktivnost. Proces traži tačnu kontrolu brzine livenja, temperature čelika, doziranja vode za hlađenje itd. Za livenje kvadratnih polufabrikata važe odnosi između dimenzije presjeka, brzine livenja, kapaciteta kristalizatora i kapaciteta kazana prema nomogramu na slici 56.

Poseban problem je predstavljalo prianjanje čelika za zidove kokile, pa se je radi podmazivanja stalno dodavao parafin ili slična materija u kristalizator. Na novim postrojenjima uvedeno je osciliranje kristalizatora, pri čemu se ovaj spušta nekoliko centimetara brzinom kretanja čelika a onda se враћa u prvobitni položaj ~ 3 puta većom brzinom. Potrošnja vode za hlađenje je visoka i kreće se oko 10 m^3 po toni čelika. Danas se već liju slabovi



Sl. 54. Shema kontinuiranog livenja čelika



Sl. 56. Nomogram za određivanje odnosa između dimenzija polufabrikata kvadratnog presjeka, kapaciteta kristalizatora, kapaciteta kazana i brzine livenja kontinuiranom postupkom. *Primer* (crtkana linija): za livenje polufabrikata preseka 165×165 mm (dužina ivice 165 mm, dijagram a) brzina livenja iznosi $1,4$ m/min, čemu odgovara kapacitet kristalizatora 280 kg/min (dijagram b); iz toga za postrojenje s jednom žilom i kapacitet kazana 12 t (dijagram d) proizlazi vrijeme livenja od 43 min (dijagram c)

dimenzijski do 1520×200 mm i kvadrati do 260 mm dužine stranice. Postoje postrojenja sa više žila. Prednosti ovog postupka jesu znatno niži troškovi proizvodnje, povećanje izvataka za $8\text{--}15\%$ (jer nema "izgubljene glave" na kraju ingota), čelik je znatno homogeniji uslijed velike brzine stvarnjavanja i ima manje segregacije; nisu potrebne kokile.

K. Kapetanović

PRERADA ČELIKA TOPLOM I HLADNOM PLASTIČNOM DEFORMACIJOM

Čelik odliven u ingote (blokove), čija težina zavisi od vrste tehničkog postupka prerade, od vrste i konstrukcije postrojenja za preradu i od vrste čelika, prerada se ispočetka u vrućem stanju, a na kraju u vrućem ili u hladnom stanju.

Zagrijani ingoti se preraduju u valjaonicama i kovačnicama bilo u polufabrikat (poluproizvod), bilo u gotove proizvode. Veći dio proizvedenog sirovog čelika ($\sim 80\%$) prerada se u valjaonicama, a ostatak prerada se u kovačnicama i u livenicama.

Prema proizvodnom assortimanu valjaonice se dijele na *profilne valjaonice* (za proizvodnju različitih profila), *valjaonice lima* (za proizvodnju limova i širokih traka iznad 500 mm širine), *valjaonice cijevi i specijalne valjaonice* (za proizvodnju različitih specijalnih profila uzdužnim, periodičnim i poprečnim valjanjem). Gotov se proizvod rijetko dobije direktno iz ingota u jednoj valjaonici, nego se obično u jednoj izvalja iz ingota polufabrikat, a u drugoj valjaonici iz tog polufabrikata, po pravilu uz posebno zagrijavanje, izvaljavaju se gotovi proizvodi (profili, limovi itd.). Neki profili mogu se izvaljati i u hladnom stanju u tzv. hladnim valjaonicama.

Skup uređaja koji sačinjavaju valjaonicu sastoji se od tri osnovna dijela: zagrevne peći, valjaoničke pruge i adjustažnih postrojenja. U zagrevnim pećima materijal se zagrijava do potrebnih temperatura, na pruzi se valja na odgovarajući assortiman, a u adjustaži, tj. na adjustažnim postrojenjima, vrši se tzv. adjustiranje: ravnanje, rezanje, pregledanje, pakovanje itd. U valjaonicama kvalitetnih čelika postoje još i peći za termičku obradu i dodatna adjustažna postrojenja. U svakom od tih odjeljenja nalaze se pomoćni i manipulativni uređaji. Stare valjaonice imaju vrlo malo takvih uređaja, te se sve pomoćne operacije obavljaju ručno. Zbog toga je i produktivnost i proizvodnja u takvim valjaonicama niska. Nove valjaonice odlikuju se većim stepenom mehanizacije, a mnoge od njih su i manje ili više automatizovane, tako da su kapaciteti i produktivnost visoki. Projektuju se i valjaonice potpuno mehanizovane, odnosno automatizovane, sa godišnjim kapacitetom od

nekoliko miliona tona izvaljanih profila. S obzirom na assortiman razlikuju se valjaonice masovnih profila (za valjanje ugljičnih i niskolegiranih čelika) i valjaonice kvalitetnih čelika. Prve su većeg (masovnog), a druge relativno mnogo manjeg kapaciteta.

Postrojenja kovačnica obuhvataju zagrevne peći, prese i čekiće, žarne peći, strojeve za mehaničku obradu otkivaka, pomoćna i manipulativna postrojenja. S obzirom na tehnologiju i assortiman kovačnice se dijele na *kovačnice za slobodno kovanje* i *kovačnice za ukovno* (matricirano, kalupno) kovanje. Valjaonice bandaža i točkova, koje uz valjaonička zahtijevaju još i kovačka postrojenja, obično se nalaze u sastavu kovačnica.

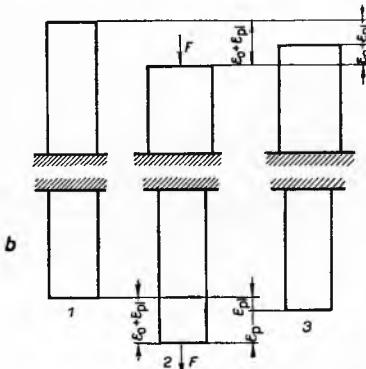
Vučenje, presovanje i duboko izvlačenje su tehnološki postupci prerade čelika koji se kao sirovinom koriste predvaljanim materijalom.

Osnovni pojmovi plastične deformacije

Elastična i plastična deformacija. Ako na čeličnu šipku poprečnog presjeka A djeluje sila F , u materijalu nastaje napon σ definisan odnosom sile prema površini poprečnog presjeka:

$$\sigma = \frac{F}{A}.$$

Sa rastućim opterećenjem raste i napon u materijalu i tijelo se deformeši, tj. mijenja oblik i dimenzije, sve dok napon ne pređe neku određenu granicu kad nastupa razaranje materijala. Ako se pak opterećeno tijelo rastereti prije nego što u njemu stvoreni napon pređe granicu elastičnosti, odnosno njoj blisko granicu razvlačenja, deformacija će nestati i tijelo će poprimiti svoj prvobitni oblik i dimenzije kakve je imalo prije početka deformacije. Takva deformacija zove se *elastična deformacija*. Ako je tijelo bilo opterećeno iznad granice razvlačenja pa se rastereti, stvorena deformacija neće potpuno isčeznuti. Iščezava samo elastična deformacija, a drugi dio deformacije će zaostati, tj. poslije



Sl. 57. Elastična i plastična deformacija: a pri sabijanju, b pri rastezanju; 1 prije opterećenja, 2 pod opterećenjem, 3 poslije rasterećenja; ϵ_{el} elastična deformacija, ϵ_{pl} plastična deformacija

prestanka djelovanja sile tijela neće poprimiti opet svoj prvobitni oblik i dimenzije (sl. 57). Takva deformacija zove se *plastična ili trajna deformacija*. Plastična je deformacija uvijek praćena elastičnom tako da obje zajedno čine punu deformaciju. Nije svaki materijal deformabilan, već ima materijala koji se pod opterećenjem razaraju, prskaju ili lome. Sposobnost tijela da se plastično deformeši zove se *plastičnost*.

Osnovna pojava pri plastičnoj deformaciji jeste pomjeranje (smicanje) jednih slojeva kristala u odnosu na druge po nekim za svaki kristal određenim atomskim ravnima u kojima su atomi najgušće raspoređeni. To su tzv. klizne ravnini ili ravnini klizanja (smicanja), a naponi koji u njima vladaju zovu se naponi smicanja. Do klizanja, a time i do deformacije, dolazi kada napon smicanja dostigne određenu kritičnu veličinu.

U procesu plastične deformacije dolazi i do medukristalne deformacije, tj. do pomjeranja, odnosno klizanja pojedinih kristalnih zrna i okretanja kristalnih zrna jednih u odnosu na druge. Pored toga, kristalna zrna se usitnjavaju i mijenjaju oblik. Kristali se drobe u manje blokove koji se unekoliko zakreću jedan prema drugom, ali se kompaktnost tijela i prostorna rešetka

unutar pojedinih blokova ne narušava. U procesu plastične deformacije, kao rezultat navedenih pojava, nastaju promjene mehaničkih i fizičko-kemijskih svojstava materijala, povećava se njegova otpornost prema deformaciji, tj. smanjuje mu se plastičnost.

Kristalna zrna, koja su prije deformacije bila različito orijentisana, za vrijeme deformacije izdužuju se u pravcu deformisanja, odnosno izduženja deformisanog tijela. Pri većoj deformaciji u određenom pravcu materijal dobija vlaknastu strukturu: obrazuje se tzv. tekstura, kod koje su kristalografske ravni orijentisane u pravcu izduženja tijela. Materijal vlaknaste strukture (teksture) nema jednaka svojstva u smjeru vlakana i poprečno na njih. Ta se pojava zove anizotropija ili vektorijalnost mehaničkih svojstava. Sa rastućom deformacijom relativno izduženje i kontrakcija u uzdužnom pravcu se povećavaju ili ostaju isti, a u poprečnom pravcu progresivno opadaju.

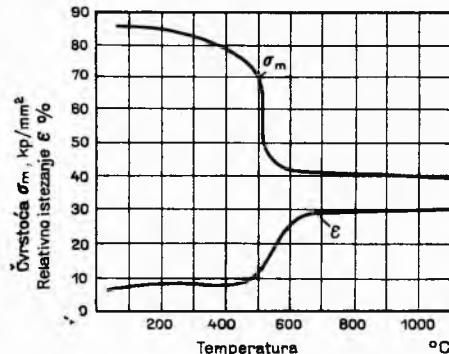
Vruća i hladna plastična deformacija. Za vrijeme plastične deformacije dolazi do očvršćavanja koje povećava otpor deformaciji i smanjuje plastičnost materijala. Očvršćavanje je posljedica pojave da se kristali pri deformaciji krše u manje komade koji se okreću jedan prema drugom elastično deformišući rešetku. Na ravnima klizanja javljaju se neravnosti koje koče klizanje i tim samim očvršćavaju materijal. U izvjesnim slučajevima za vrijeme deformacije čelik toliko očvrstne (toliko mu se poveća otpor deformaciji) da ga praktično nije moguće dalje deformisati, ako se ne omekša. Radi omekšavanja čelik se zagrijava, podvrgava *rekristalizacionom žarenju* (vidi poglavlje Termička obrada u ovom članku).

Ako se čelik plastično deformeše na temperaturi višoj od temperature početka rekristalizacije, paralelno sa procesom očvršćavanja odvija se i proces omekšavanja, jer se istovremeno sa deformacijom jednih kristala stvaraju novi kristali, tj. vrši se proces rekristalizacije. Ako se u procesu deformacije postigne potpuna rekristalizacija, takva se deformacija zove vruća (topla) deformacija, a ako rekristalizacija potpuno izostane, deformacija se zove *hladna deformacija*. Oštре temperaturne granice između vruće i hladne deformacije nema, jer temperatura na kojoj nastaje jedna ili druga zavisi od brzine deformacije i prirode materijala koji se deformeše.

Vlaknasta struktura metala i primjesa, stvorena hladnom plastičnom deformacijom, ostaje i nakon izvršene deformacije (ukoliko se materijal ne ižari). Zbog toga je anizotropija svojstava takvog materijala posebno izražena. Smanjuju se pokazatelji plastičnosti: relativno izduženje, kontrakcija i udarna žilavost, a povećavaju se pokazatelji otpora deformaciji: granica razvlačenja, zatezna čvrstoća i tvrdoća. Sa povećanjem deformacije povećava se čvrstoća, a smanjuje relativno izduženje (istezanje, slika 58). Osim toga se hladno deformisanim čeliku smanjuje otpornost protiv korozije i mijenjaju magnetna svojstva: koercitivna sila i gubici histerezom povećavaju se, a sposobnost magnetisanja se smanjuje.

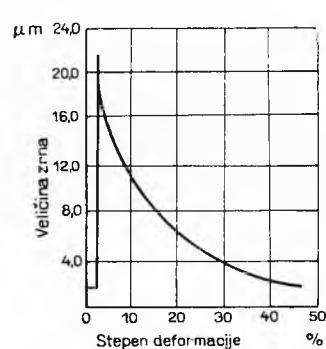
Zagrijavanjem hladno deformisanog čelika mogu da se poboljšaju njegove mehaničke osobine, da se smanji čvrstoća i poveća istezanje. Posljedice hladne deformacije potpuno se od-

strane ako se čelik zagrije na temperaturu iznad temperaturu rekristalizacije (slika 59). Zavisno od temperature zagrijavanja i stepena hladne deformacije može da se dobije sitnija ili krupnija struktura, a time mogu da se postignu bolje ili lošije mehaničke osobine.



Sl. 59. Uticaj temperature zagrijavanja na osobine hladnodeformisanog čelika

osobine. Čelik do različitih stepena hladno deformešan i poslije toga žaren na istoj temperaturi imaće zavisno od stepena deformacije različitu strukturu, a time i različita svojstva. Najkrupniju strukturu pokazaće materijal čiji je stepen deformacije iznosio ~ 5% (slika 60). Takva deformacija pri kojoj se dobije maksimalna veličina zrna zove se *kritična deformacija*. Sa rastućom deformacijom dobije se sitnija struktura jer se tada stvara veći broj novih zrna. (V. poglavlje Termička obrada u ovom članku).



Sl. 60. Uticaj stepena deformacije na veličinu zrna čelika zagrijanog poslije hladne deformacije na istu temperaturu

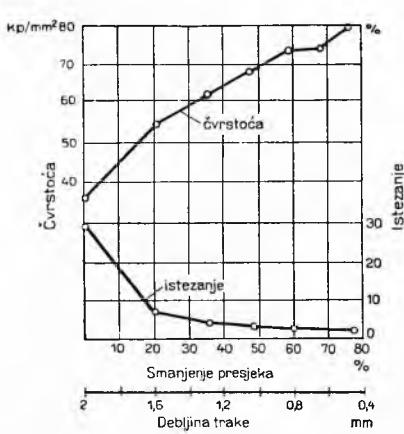
Pri vrućoj (toploj) deformaciji zrna se također deformešu, ali zahvaljujući rekristalizaciji dobija se struktura sa dobrim mehaničkim osobinama. Pojava vlaknate strukture u vruće deformešanom čeliku rezultat je djeljstva njegovih primjesa. Deformacija uz rekristalizaciju istovremeno povećava plastičnost za dvostruko i više, a smanjuje otpor deformaciji na petinu do desetinu, a nekada i na petnaestinu, u odnosu na efekte hladne deformacije.

Gornja temperaturna granica vruće deformacije je niža od temperature na kojoj počinje oksidacija kristalnih zrna, a donja granica je iznad temperature rekristalizacije (sl. 61).

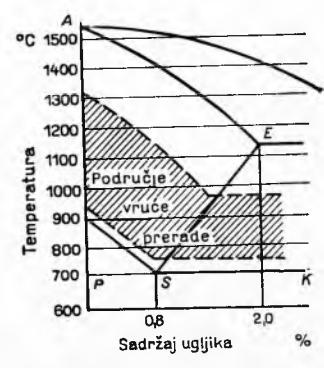
Brzina deformacije ima znatan uticaj na karakter vruće deformacije. Ako je brzina deformacije veća od brzine rekristalizacije, i na relativno visokoj temperaturi nastaje očvršćavanje materijala.

Veličina kristalnih zrna zavisi od konačne temperature, od stepena deformacije i od temperature i trajanja zagrijavanja prije deformacije. Što je viša temperatura zagrijavanja i što zagrijavanje traje duže vremena to materijal pokazuje krupniju strukturu pri istoj brzini i istoj veličini deformacije; obrnuto, što je niža temperatura završetka procesa deformacije i što je deformacija bila veća to deformešani materijal pokazuje finiju strukturu.

Plastična svojstva i otpornost deformaciji čelika. Plastičnost čelika može se odrediti na više načina: istezanjem,



Sl. 58. Čvrstoća i istezanje hladnovaljane trake od niskougličnog čelika (po Pompu i Weicheru)



Sl. 61. Područje vruće deformacije u dijagramu stanja Fe-C

valjanjem na klin, udarom, uvijanjem (torzijom) i sl. Pokazatelji plastičnosti jesu: pri istezanju — relativno izduženje i kontrakcija, pri valjanju i sabijanju — relativna redukcija, pri udaru — udarna žilavost, pri torziji — broj uvrta do pojave pucanja itd.

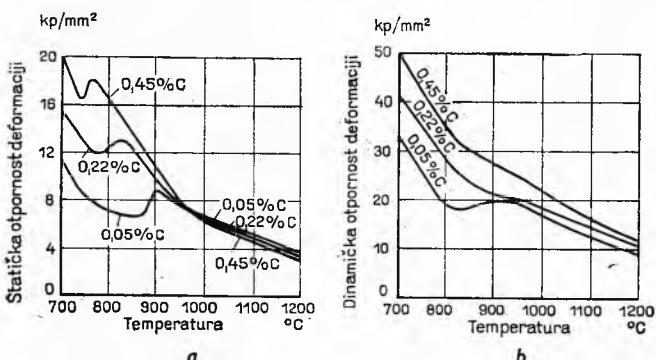
Što je veća plastičnost čelika to on pri nekom tehnološkom postupku plastične prerade podnosi veći stepen deformacije a da ne dođe do prskotina ili loma. Većina ugljičnih čelika po svojoj plastičnosti dozvoljavaju redukcije preko 80%, legirani čelici do ~ 80%.

U praksi je poznata činjenica da čelici na različnim temperaturama pokazuju različitu plastičnost, kao i to da na istoj temperaturi jedan čelik pokazuje veću a drugi manju plastičnost. Općenito, čelik na višoj temperaturi ima veću plastičnost, tj. može se deformisati sa većom redukcijom do pojave prskotina. Hemski sastav čelika ima osnovni uticaj na njegovu plastičnost.

Otpornost deformaciji predstavlja stvarni napon nastao pri linearном istezanju, tj. $\sigma = F/A$, gdje je F sila, a A površina presjeka štapa u datom momentu naprezanja silom F . Otpor deformaciji treba poznavati da bi se mogao da odredi pritisak materijala na alate kojim se materijal deformeše, zatim snaga potrebna za plastičnu deformaciju, odnosno tehnološki postupak. Otpornost deformaciji pri nekom tehnološkom postupku određuje se prema dijagramima stvarnih naponi pri istezanju. Ovi se dijagrami snimaju pod uslovima koji treba da se što više približavaju praktičnim uslovima u određenom postupku, kako bi se dobile što realnije vrijednosti otpornosti deformaciji.

Otpornost deformaciji čelika u uskoj je vezi sa njegovom čvrstoćom, tj. čelik veće zatezne čvrstoće ima i veću otpornost deformaciji. Obje veličine izražavaju se u kp/mm^2 .

Osnovni faktori od kojih zavisi otpornost deformaciji čelika jesu njegov hemski sastav (vrsta čelika), temperatura i brzina deformacije. Elementi u čeliku koji povećavaju njegovu čvrstoću povećavaju takođe i otpornost deformaciji. Brzina deformacije utiče na otpornost deformaciji u tom smislu da se sa rastućom brzinom deformacije povećava otpornost deformaciji. Na osnovu ispitivanja ustanovljeno je da ugljični čelici imaju 2–4 puta veću, a legirani 2,5–3 puta veću otpornost pri dinamičkom ispitivanju nego pri statičkom ispitivanju (slika 62). Otpornost deformaciji



Sl. 62. Otpornost deformaciji ugljičnih čelika u zavisnosti od temperature (Hennecke). a) Statička, b) dinamička deformacija

u zavisnosti od brzine deformacije obično se određuje eksperimentom radi dobijanja tačnijih rezultata, iako se može izračunati i analitičkim putem.

Temperatura utiče na otpornost deformaciji čelika tako da se sa porastom temperature smanjuje po eksponencijalnom zakonu:

$$\sigma_{t_1} = \sigma_{t_2} \cdot \exp \alpha (t_2 - t_1),$$

gdje σ općenito označava otpornost deformaciji, granicu razvlačenja ili zateznu čvrstoću, t_1 i t_2 konačnu i početnu temperaturu, α temperaturni koeficijent istezanja.

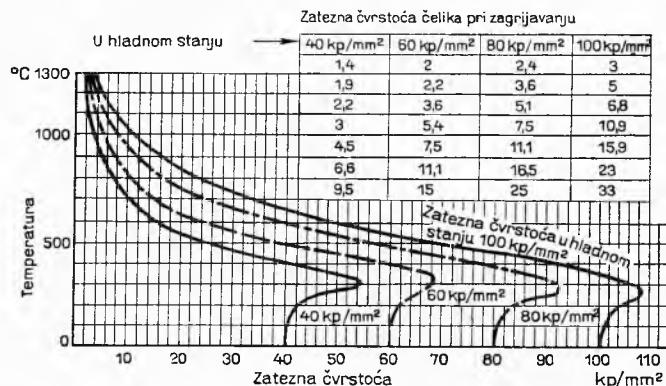
Pri vrućoj deformaciji krivulja stvarnih naponi (u dijagramu istezanja) približno je paralelna s osi apscisa te je $\sigma_v \approx \sigma_m$, tj. granica razvlačenja je približno jednaka zateznoj čvrstoći, te je prema tome i otpornost deformaciji približno jednaka granici razvlačenja, odnosno zateznoj čvrstoći. Budući da je na visokim

temperaturama određivanje zatezne čvrstoće znatno jednostavnije nego određivanje granice razvlačenja, to se pri vrućoj deformaciji za mjeru otpornosti deformaciji može uzeti čvrstoća materijala.

Otpornost deformaciji pri statičkom sabijanju čelika, u zavisnosti od njegove temperature i hemijskog sastava, može se izračunati po Ekelundu prema empirijskoj formuli:

$$k = (14 - 0,01 t)(1,4 + C + Mn + 0,3 Cr),$$

gdje je k otpornost deformaciji u kp/mm^2 , simboli C, Mn i Cr predstavljaju sadržaj ugljika, mangana i hroma u čeliku (u percentima), a t temperatuру čelika u °C. Osim ove postoje mnoge formule za izračunavanje otpornosti deformaciji, ali svaka od



Sl. 63. Zavisnost otpora deformaciji (čvrstoće) različitih čelika od temperature

nih daje samo orijentacione vrijednosti. Tačne vrijednosti otpornosti deformaciji za pojedine čelike mogu se dobiti opitim putem. Veličine otpora deformaciji (čvrstoće) na različitim temperaturama za čelike određene čvrstoće u hladnom stanju i hemijskog sastava 0,6% C, 0,5% Si, 0,8% Mn prikazane su na slici 63.

Osnovni zakoni plastične deformacije. Za plastičnu deformaciju postoje dva osnovna zakona: zakon o nepromjenljivosti volumena i zakon (uslov) početka plastične deformacije.

U deformacijskoj zoni tijela koje se deformiše mogu se u svakoj tački postaviti tri uzajamno okomita pravca koji se podudaraju sa glavnim osima i zovu *glavni pravci*. U ravнима normalnim na te pravce (*glavnim ravнима*) djeluju naponi koji se zovu *glavni naponi* i označavaju se sa σ_1 , σ_2 i σ_3 , pri čemu je $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. U tim ravнима naponi smicanja ravnii su nuli. Glavni naponi smicanja (τ) djeluju u ravнима koje raspolažaju uglove između glavnih ravnii, tj. koje s glavnim ravnima zatvaraju uglove od 45°. Ovi naponi smicanja, kako je naprijed rečeno, izazivaju pomjerenje jednih slojeva u odnosu na druge, tj. deformaciju tijela. Izazvane deformacije u pravcima glavnih osi označavaju se kao glavne relativne deformacije ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 , pri čemu je $\epsilon_1 > \epsilon_3 > \epsilon_2$, tj. maksimalnom glavnom naponu odgovara maksimalna deformacija, a srednjem (po veličini) glavnom naponu odgovara minimalna deformacija. Takvo napregnuto stanje tijela u kojem vladaju sva tri glavna naponi označava se kao prostorno napregnuto stanje. Glavni naponi mogu biti takvi da djeluju u pravcima svestranog rastezanja, u pravcima svestranog pritiska (sabijanja), i konačno u pravcima i rastezanja i pritiska. Od karaktera tih naponova zavisi kakvu će plastičnost pokazati materijal pri svojoj deformaciji. Pri svestranom, ravnomjernom rastezanju, kada je $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, materijal se brzo razruši. Pri svestranom ravnomjernom sabijanju do deformacije ne može doći zbog postojnosti (konstantnosti) volumena materijala. Prema tome, svi tehnološki postupci prerade materijala odvijaju se ili pri djelovanju nejednakog svestranog pritiska, ili pri djelovanju i pritisku i istezanju.

Napon pritiska potpomaže intrakristalnu deformaciju, a svodi do minimuma interkristalnu deformaciju. Napon istezanja potpomaže interkristalnu deformaciju, što se odražava u opadanju plastičnosti i pojavi krutosti. Na taj način, što su manji napon istezanja a veći naponi pritiska u određenom napregnutom stanju, materijal pokazuje veću sposobnost za plastičnu deformaciju. Dalje, sa rastućim odnosom σ_1 i σ_3 prema σ_1 raste i sposobnost tijela da se plastično deformeše.

Početak plastične deformacije određuje se prema energetskoj ili »četvrtjoj« teoriji plastičnosti. Prema toj teoriji plastična deformacija počinje kad se uslijed djelovanja vanjskih sila u tijelu nakupi određena potencijalna energija potrebna za promjenu oblika tijela. Ta teorija izražava se jednačinom plastičnosti:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 k_v^2.$$

Veličina srednjeg napona σ_2 može da ima vrijednost od σ_1 do σ_3 . Radi lakšeg korištenja jednačinom, pretpostavlja se da je $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, te se dobija

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot k_v = 1,15 k_v = k.$$

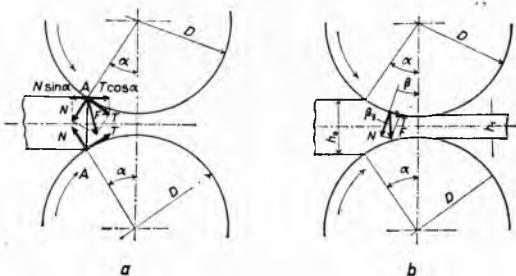
Pri korištenju navedenom jednačinom uzimaju se algebarske veličine normalnih napona, tj. uzima se u obzir predznak tih napona, i to tako da su naponi istezanja pozitivni (+), a naponi sabijanja (pritiska) negativni (-). Stoga je pravilnije jednačinu plastičnosti pisati u obliku:

$$(\pm \sigma_1) - (\pm \sigma_3) = 1,15 k_v = k.$$

Prema tome, plastična deformacija počinje kad razlika između maksimalnog (σ_1) i minimalnog (σ_3) napona dostigne određenu otpornost deformaciji (k). Ako se zanemari brzina deformacije, može se uzeti da je veličina k_v približno jednaka granici razvlačenja σ_v materijala na dатој temperaturi.

Pri razmatranju tehnoloških procesa uzima se da se volumen pri plastičnoj deformaciji ne mijenja. U stvari, pri hladnoj deformaciji volumen se nešto smanjuje, ali su te promjene volumena neznatne te se zanemaruju.

Osnovni parametri procesa valjanja. Valjanje je tehnološki postupak plastične prerade koji se sastoje u neprestanom stiskanju (sabijanju) materijala između obrtno pogonjenih valjaka. U momentu dodira materijala sa valjcima nastaju na dodirnoj površini radikalni pritisci, a kao rezultat toga i sile trenja koje uvlače materijal u valjke (slika 64). Sa ulazom komada u valjke rezultanta sile pomicaju se prema izlazu komada iz valjaka. Prostor u kome nastaje deformacija materijala, od njegovog ulaza u valjke (tačka A, slika 65) do izlaza iz valjaka (tačka B, slika 65) zove se *zona deformacije*, tj. da bi valjani materijal prošao kroz otvor (kalibar) između valjaka, koeficijent trenja na dodirnoj površini materijala i valjaka mora biti veći od tangensa zahvatnog ugla ($\mu \geq \tan \alpha$). Veličina zahvatnog ugla kreće se od 3 do 10° kod hladnog valjanja, a od 15 do 30° i više kod vrućeg valjanja. Sto



Sl. 64. Sile koje djeluju na valjani materijal u momentu njegovog zahvata valjcima

je veći koeficijent trenja (hrapavija površina valjaka, niža temperatura valjanog materijala itd.) to je moguće intenzivnije valjanje, tj. valjanje sa većim redukcijama, što se vidi iz razmatranja pro-vedenog u nastavku.

Veličina zahvatnog ugla (slika 65) određena je formulom:

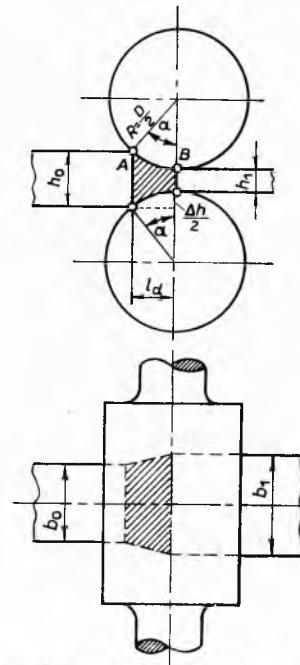
$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D},$$

pa je veličina visinske redukcije:

$$\Delta h = D(1 - \cos \alpha).$$

Uzimajući da je $\tan \alpha = \mu$, računski se dobija veličina maksimalne redukcije koju je moguće postići s obzirom na zahvat komada valjcima:

$$\Delta h = D \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \right),$$



Sl. 65. Zone deformacije pri valjanju

$$V_0 = V_1 = b_0 \cdot h_0 \cdot l_0 = b_1 \cdot h_1 \cdot l_1.$$

Odatle je:

$$\frac{b_0 \cdot h_0}{b_1 \cdot h_1} = \frac{l_1}{l_0} = \frac{A_0}{A_1} = \mu.$$

Taj odnos početnog presjeka prema konačnom presjeku, ili odnos konačne dužine prema početnoj dužini, predstavlja mjeru za uzdužnu deformaciju, izduženje, i naziva se stoga koeficijent izduženja (μ). Osim koeficijenta izduženja postoje i drugi parametri kojima se označava deformacija pri valjanju; takvi su parametri: apsolutna visinska deformacija (redukcija): $\Delta h = h_0 - h_1$, relativna visinska deformacija (redukcija): $\epsilon = (h_0 - h_1)/h_0 = \Delta h/h_0$, koeficijent (stepen) visinske deformacije: $\eta = h_0/h_1$, apsolutna bočna (poprečna) deformacija: $\Delta b = b_0 - b_1$, koeficijent bočne deformacije (redukcije): $\lambda = b_0/b_1$, širenje materijala: $\Delta b = b_1 - b_0$, koeficijent širenja materijala: $\beta = b_1/b_0 = 1/\lambda$, apsolutna veličina redukcije presjeka: $\Delta A = A_0 - A_1$, relativna veličina redukcije presjeka: $(A_0 - A_1)/A_0 = \Delta A/A_0$.

Između pojedinih deformacija postoji odnos:

$$\mu = \eta \cdot \lambda = \frac{\eta}{\beta}.$$

Veličina deformacije (redukcije u jednoj provlaci, na jednom kalibrusu) može biti vrlo različita, jer zavisi od više faktora, kao npr. od vrste valjanog čelika i njegove plastičnosti, od vrste valjanog profila (proizvoda), od konstrukcije kalibracije, od dimenzija i mehaničkih svojstava valjaoničkih valjaka, od snage pogonskih motora itd. Tako redukcije presjeka ili visine u jednoj provlaci (jednom propuštanju komada između valjaka) mogu biti 10...50% i više, a stepen visinske deformacije i preko 2.

Pritisak materijala na valjke pri valjanju. Za vrijeme valjanja nastaje na valjcima pritisak (sila) materijala F , koji je ravan umnošku srednjeg specifičnog pritiska materijala na valjke p_{sr} i dodirne površine valjanog materijala sa jednim od valjaka:

$$F = p_{sr} \cdot A.$$

Dodirna površina kod valjanja limova, traka i profila pravokutnog presjeka, gdje se valjci dodiruju sa materijalom svojom cilindričnom površinom, iznosi prema sl. 65:

$$A = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot l_d.$$

Veličina l_d predstavlja dužinu zone deformacije, a jednaka je:

$$l_d = \sqrt{R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}, \text{ gdje je } R \text{ radijus valjka.}$$

gdje je D promjer onog dijela valjka na kojem se vrši valjanje (sa kojim materijal dolazi u dodir).

U procesu valjanja javljaju se tri glavna naprezanja ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) i tri glavne deformacije ($\epsilon_1 > \epsilon_3 > \epsilon_2$): visinska, uzdužna i poprečna deformacija. Naime, pod uticajem stiskanja nastupa visinska deformacija, jer je visina h_0 komada što ulazi veća od visine otvora valjaka (visine kalibra) h_1 . Istovremeno se materijal izdužava, a i širi, ukoliko to ne sprečava konstrukcija valjaka. U izvjesnim slučajevima (kad se valjuju fazonski profili) osim visinske (direktne) deformacije nastaje još i bočna (indirektna) deformacija. Prema zakonu plastične deformacije pri deformaciji materijalu se ne mijenja volumen, već samo oblik i dimenzije; volumen materijala prije ulaza u valjke jednak je, dakle, njegovom volumenu pri izlazu iz valjaka:

Budući da je veličina $\Delta h^2/4$ malena u poređenju sa veličinom $R \Delta h$, ona se može zanemariti, pa je dužina zone deformacije:

$$l_d = \sqrt{R \Delta h}.$$

Prema tome, u ovom slučaju horizontalna projekcija dodirne površine, ili, kako se obično govori, dodirna površina, jest:

$$A = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{R \Delta h} = b_{sr} \sqrt{R \Delta h},$$

gdje je b_{sr} srednja širina valjanog komada. U drugim slučajevima valjanja dodirna površina može se odrediti grafički. Budući da se veličina specifičnog pritiska mijenja po dužini i širini zone deformacije, za izračunavanje sile na valjcima računa se sa srednjim specifičnim pritiskom. Njegova se vrijednost može izračunati po nekoj od brojnih formula koje daju razni autori, a može se odrediti i opitnim putem.

Prema formuli Ekelunda srednji specifični pritisak (u kp/mm²) iznosi:

$$p_{sr} = \left(1 + \frac{1,6 \mu \sqrt{R \Delta h} - 1,2 \Delta h}{h_0 + h_1} \right) \left(k + \frac{2 \eta v \sqrt{\Delta h / R}}{h_0 + h_1} \right),$$

gdje je μ koeficijent trenja [za čelične valjke $\mu = 1,05 - 0,0005 t$, za tvrde valjke iz sivog liva $\mu = 0,8 (1,05 - 0,0005 t)$]; η koeficijent žilavosti u kp sek/mm² [$\eta = 0,01 (14 - 0,01 t) C_v$, pri čemu je C_v koeficijent zavisan od brzine valjanja, koji za veće brzine ima vrijednost 0,6, a za male 0,6...1,0]; k je otpor deformaciji pri statičkom sabijanju materijala, kp/mm², koji je zavisan od temperature i hemijskog sastava čelika; v brzina valjanja u mm/sek; t temperatura valjanog čelika u °C; b_0 i b_1 , h_0 i h_1 širina valjanog komada odn. visina prije i poslije valjanja u mm; R radijus valjka u mm, $\Delta h = h_0 - h_1$ visinska redukcija u mm.

Sila pritiska na valjcima je prema tome:

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{R \Delta h} \cdot p_{sr}.$$

Deformacija materijala pri kovanju. Pri kovačkom sabijanju jednog čeličnog tijela, uslijed trenja na dodirnim površinama, bočne stranice tijela ne ostaju ravne nego se ispuče, tj. deformacija se ne odvija ravnomjerno po vertikalnom presjeku. Međutim, u matematičkoj analizi plastične deformacije pretpostavlja se da se deformacija odvija ravnomjerno u svim presjecima po visini tijela koje se deformeše. Ako se jedan čelični komad oblika paralelepipeda sa stranicama h_0 , b_0 , l_0 deformeše sabijanjem, on nakon deformacije ima dimenzije h_1 , b_1 , l_1 .

Apsolutne veličine glavnih deformacija jesu $\Delta h = h_0 - h_1$; $\Delta b = b_1 - b_0$; $\Delta l = l_1 - l_0$, a relativne glavne deformacije jesu:

$$\delta_1 = \frac{\Delta h}{h_0}; \quad \delta_2 = \frac{\Delta b}{b_0}; \quad \delta_3 = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Stvarna glavna deformacija predstavlja integral odnosa diferencijalne promjene dimenzije prema dimenziji u datom momentu deformacije:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \int_{h_1}^{h_0} \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h_0}{h_1} \\ \epsilon_2 &= \int_{b_0}^{b_1} \frac{db_x}{b_x} = \ln \frac{b_1}{b_0} \\ \epsilon_3 &= \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl_x}{l_x} = \ln \frac{l_1}{l_0}. \end{aligned}$$

Iz uslova nepromjenljivosti volumena proizlazi da je:

$$\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 = 1,$$

ili

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \ln \frac{h_0}{h_1} + \ln \frac{b_1}{b_0} + \ln \frac{l_1}{l_0} = 0.$$

Sila potrebna za sabijanje iznosi: $F = A \cdot p$, gdje je A površina na koju se prenosi pritisak a p specifični pritisak ili otpor deformaciji.

Deformacijski rad je:

$$W = \int_{h_1}^{h_0} F dh = \int_{h_1}^{h_0} A p dh.$$

Na proizvoljnoj visini pripadajući presjek je $A = V/h$, te uz pretpostavku da je specifični pritisak (otpor deformaciji) nepromjenljiv, može se pisati:

$$W = p \int_{h_1}^{h_0} \frac{V}{h} dh = p V \ln \frac{h_0}{h_1}.$$

Veličina $V \ln \frac{h_0}{h_1}$ naziva se *istisnuti volumen*, te je prema tome deformacijski rad pri sabijanju jednak umnošku istisnutog volumena i specifičnog pritiska. Budući da se pri kovanju specifični pritisak mijenja na dužini zone deformacije (na pritisnutoj površini), kao i pri valjanju, to je potrebno računati sa srednjom vrijednosti specifičnog pritiska. Pri izračunavanju srednjeg specifičnog pritiska polazi se od jednačine plastičnosti $\sigma_1 - \sigma_3 = 1,15 k_v$. Nakon izvjesnog računa dobija se ovaj izraz za veličinu srednjeg specifičnog pritiska:

$$p_{sr} = k_v \cdot \frac{h}{\mu b} \cdot (\exp \frac{\mu b}{h} - 1).$$

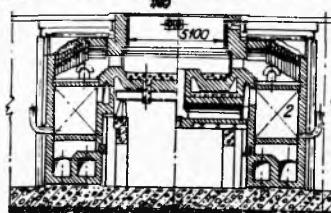
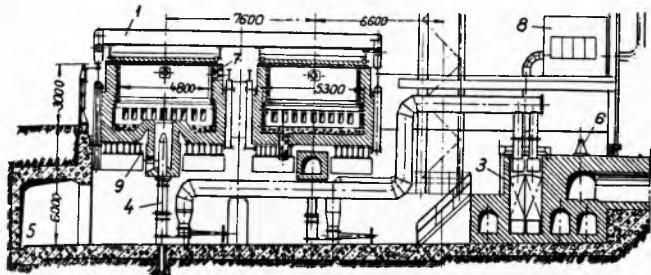
Koeficijent trenja μ iznosi od 0,1 do 0,2 za glatke, i do 0,5 za vrlo hrapave pritisnute površine. U tim formulama k_v je jednak jačini materijala pri sabijanju (pritiškanju), h je visina na koju se komad sabija. Kad se kuje medu nagnutim površinama, uzima se srednja visina $h = \frac{h_1 + h_2}{2}$.

Zagrijavanje čelika prije prerade plastičnom deformacijom. Prijе prerade u valjaonicama i kovačnicama čelik se zagrijava da bi se povećala njegova plastičnost i smanjila otpornost deformaciji. Temperaturno područje vruće plastične prerade čelika prikazano je u dijagramu Fe-C na slici 61. Temperatura na koju se čelik zagrijava iznosi 1150...1250 °C. Pri tome se čelik sa manjim sadržajem ugljika zagrijava na višu, a čelik sa većim sadržajem ugljika na nižu temperaturu. Najniža temperatura na kojoj treba završiti preradu iznosi 850...900 °C.

Kao gorivo za zagrijavanje najviše se upotrebljavaju generatorski, visokopečni, koksni i zemni plinovi. Zbog niske kalorične vrijednosti visokopečnog plina obično se taj plin miješa sa koksnim u tzv. miješani plin kalorične vrijednosti 1600...1800 kcal/Nm³. Tečna goriva nafta i mazut takođe se upotrebljavaju, bilo sami za sebe bilo kao dodatak plinskom gorivu, radi intenzivnijeg zagrijavanja čelika u peći.

Brzina zagrijavanja materijala uloženog u peć zavisi od toplotne provodnosti čelika. Na nižim temperaturama čelik ima nižu toplotnu provodnost nego na višim, zbog čega čelik u početku treba zagrijavati sporije, a kasnije brže. Toplotna provodnost čelika opada sa rastućim procentom ugljika i legirajućih elemenata u njemu. Na višim temperaturama se gotovo izjednačuje toplotna provodnost svih čelika. Zbog toga se u praksi čelici sa srednjim i višim sadržajem ugljika i legirani čelici do temperature ~700 °C zagrijavaju lagano, a iznad te temperature svi čelici se zagrijavaju jednakom i povećanom brzinom. Ako se materijal predugo drži u peći, osobito na višim temperaturama, dolazi do njegovog pregrijavanja (stvaranja krupozrnate strukture), smanjenja plastičnosti, povećanja odgorka (oksidne kore na površini), a kod čelika sa povиšenim sadržajem ugljika i do razugličenja površinskog sloja. Vrijeme zagrijavanja znatno je kraće kad je uložak vruć nego kad je hladan.

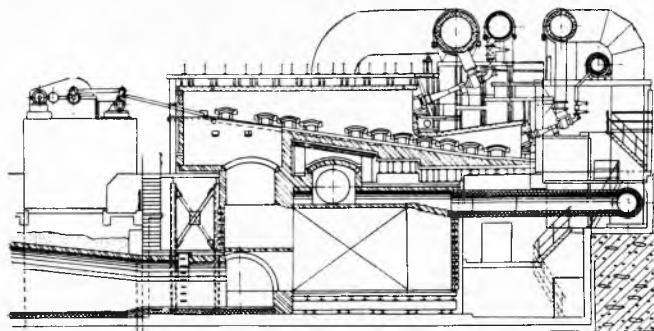
Za zagrijavanje čelika prije njegove prerade služe peći različitih tipova i različite konstrukcije. S obzirom na vrstu goriva te peći se mogu podijeliti u dvije grupe: plamene i električne. U plamenim pećima uloženi materijal se zagrijava toplotom nastalom uslijed sagorijevanja plinova, a u električnim pećima s pomoću električne energije. S obzirom na temperaturni režim, plamene peći dijele se na komorne i metodične (prohodne). U komornim pećima cijeli prostor za zagrijavanje ima istu temperaturu, u metodičnim (prohodnim) pećima, u prostoru za zagrijavanje vladaju različite temperature, tj. te su peći podijeljene u nekoliko zagrijevnih zona.



Sl. 66. Rekuperativna dvokomorna zagrijevna dubinska peć. 1 Stroj za dizanje poklopca, 2 rekonvolutator za zrak, 3 rekonvolutator za plin, 4 gorionik, 5 kanal za trosku, 6 dimni zasun, 7 pirometar, 8 kabina kontrolno-mjerne aparature, 9 zračni hladionik

Komorne peći za zagrijavanje polufabrikata i ingota malih težina izradene su u obliku ognjišta tako da se materijal u njima zagrijava u horizontalnom položaju. Za zagrijavanje blokova većih težina upotrebljavaju se u kovačnicama komorne peći sa pokretnim (izvlačnim) podom. Za zagrijavanje većih ingota (mase obično veće od 3 tone) u valjaonicama se upotrebljavaju komorne peći postavljene jednim dijelom u podu a ingoti se u peć stavljaju u vertikalnom položaju. Takve se peći zovu *dubinske peći*, a imaju jednu ili više komora koje mogu biti pravokutnog ili kružnog oblika.

Veličina jedne zagrijevne dubinske peći, odnosno jedne njene komore, takva je da u nju može stati nekoliko ingota (sl. 66), kojima ukupna težina obično odgovara težini jedne čeličanske taline.



Sl. 67. Potisna peć sistema Morgan za zagrijavanje gredica

Prohodne peći mogu biti potisne, koračne i kružne (karuselne). Upotrebljavaju se za zagrijavanja polufabrikata svih vrsta i dimenzija i za manje ingote (ali ne preko 3 tone mase). Najviše se primjenjuju potisne peći (slika 67) čiji je unutarnji prostor širok 2...12 m i dug 10...30 m, a kapacitet im je od 20 do 200 t/h. Materijal se ulaze u peć na jednom kraju, a zagrijani materijal se izbacuje iz peći na drugom kraju. Materijal se potiskuje u peć potisnim strojevima.

Koračne peći (Hubbalkenofen) imaju pomicni pod koji postepeno prenosi materijal od ulaza u peć do izlaza iz peći. Nisu tako rasprostranjene zbog težeg održavanja i zbog toga što troska koja se stvara na površini uloška pada na pod peći i ometa njen rad, osobito pri zagrijavanju ingota.

Kružne (karuselne) peći imaju kružno ognjište koje se zajedno sa uložnim materijalom okreće u horizontalnoj ravni određenom brzinom koja odgovara brzini zagrijavanja uloženog čelika. Upo-

trebljavaju se za zagrijavanje polufabrikata i manjih blokova. Radi boljeg korišćenja toplote sve plamene peći su snabdjevene regeneratorima (regenerativne peći) ili rekuperatorima (rekuperativne peći), pomoću kojih se toplota izlaznih (sagorjelih) plinova iskorištava za predgrijavanje zraka, a kod nekih peći i plina.

Pored plamenih peći, u zemljama koje imaju dovoljno jeftine električne energije (u Švedskoj i Norveškoj) grade se industrijske električne peći za zagrijavanje polufabrikata i ingota.

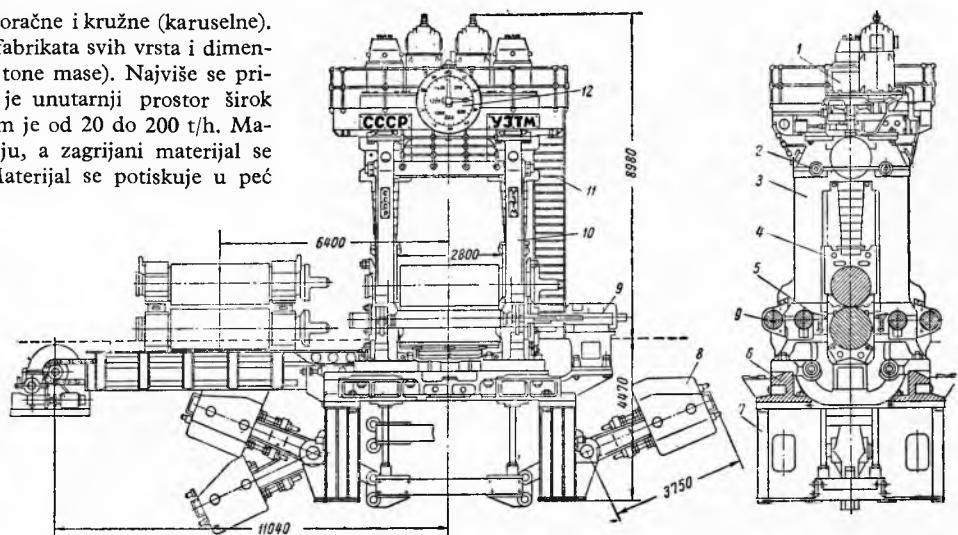
Proizvodnja valjanog polufabrikata

Polufabrikatom se naziva materijal koji se izvalja iz ingota i zatim upotrebljava za daljnju preradu u finalni proizvod u valjaonicama i u kovačnicama. U polufabrikate spadaju: blumovi, slabovi, gredice i platine. Blumovi su polufabrikat obično kvadratnog ili sličnog presjeka 150 × 150 do 400 × 400 mm, a mogu biti takođe kružnog i fazonskog presjeka. Rubovi blumova su zaobljeni. Gredice imaju kvadratni presjek ispod 150 × 150 mm. Slabovi imaju pravokutni presjek širine 500...2000 mm i debljine 50...300 mm. Platine imaju presjek širine 150...500 i debljine 5...50 mm.

Navedeni polufabrikati dobivali su se ranije isključivo valjanjem iz ingota, a i danas se pretežno dobivaju na taj način. U posljednje vrijeme naglo se razvija njihova proizvodnja kontinuiranim livenjem. Kako u tom slučaju otpadaju teška postrojenja za valjanje, izrada polufabrikata kontinuiranim livenjem predstavlja savremeniji i ekonomičniji način proizvodnje.

Valjanje blumova. U savremenim metalurškim preduzećima blumovi se valjuju iz ingota na bluminzima, a u starim preduzećima na teškim (grubim) linijskim prugama koje se sastoje od jednog do četiri stana.

Bluming predstavlja valjačku duo-prugu sastavljenu od jednog reverzirnog valjačkog stana i pomoćnih postrojenja kako prikazuje sl. 69. Obično se svaki od dva valjka valjačkog stana pogoni zasebnim istosmjernim elektromotorom, rjede se oba valjka reverzirnog valjačkog stana bluminga pogone jednim istosmjernim elektromotorom preko prenosnog stana. (Duo-pruga se tako zove zato što se u valjačkom stanu nalaze dva valjka. U valjačkim stanovima trio-pruge nalaze se po tri valjka, kvarto-pruge po četiri valjka itd.) Valjački stan na slici 68 sastoji se od dva stalaka učvršćena za temelj i među sobom povezana, sa ugrađenim valjcima za valjanje i uređajima za podešavanje valjaka. Valjački stan je vezan sa elektromotorima preko prenosnih vretena bilo direktno bilo indirektno preko prenosnog stana (grebenjaka) i reduktora, a snabdjeven je pomoćnim postrojenjima kao što su kotrljače, prevlačnici i manipulator (sastavljen od lineala sa prevrtaćem), zatim noževi, pile i hladnjak. Valjački stan i sva pomoćna postrojenja čine jednu *valjačku prugu*. U jednoj valjačkoj pruzi može biti



Sl. 68. Valjački stan bluminga 1150 mm. 1 Uredaj za pritiskanje gornjeg valjka, 2 poprečne šipke za učvršćenje stalaka stana, 3 stalci, 4 ležaji sa valjcima, 5 grede sa vodicama, 6 temeljni ploči, 7 nosači temeljnih ploča, 8 uređaj za balansiranje, 9 pomoćne role, 10 stalci stana, 11 ljestve, 12 kazaljke koje pokazuju visinu dizanja gornjeg valjka

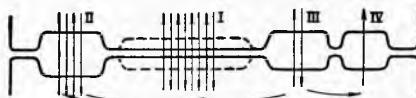
jedan valjački stan ili više njih. Ako se valjačkoj pruzi dodaju još zagrevne peći i adjustažna postrojenja (ravnalice, noževi za hladno rezanje, eventualno još i bušilice, peći za termičku obradu i neka druga postrojenja koja su potrebna za adjustažne operacije), takav sklop postrojenja čini jednu *valjaonicu*.

Prema promjeru valjka u valjačkom stanu razlikuju se: teški bluminzi ($D = 1100 \dots 1200$ mm i više), srednji bluminzi ($D = 900 \dots 1000$ mm), laki (mali) bluminzi ($D < 900$ mm).

Dimenzije i težina ostalih postrojenja zavisni su od promjera valjaka u valjačkom stanu, a od veličine svih tih postrojenja zavisi i kapacitet bluming-valjaonice, koji se kreće od 250 kt do 3 Mt i više izvaljanih ingota godišnje. Za veće kapacitete grade se bluminzi koji imaju dva i više stanova postavljenih jedan iza drugog, sa godišnjim kapacitetom od 5..10 Mt izvaljanih ingota.

Bez obzira na kapacitet bluminga, veličinu postrojenja, težinu valjanih ingota i dimenzije izvaljanog polufabrikata, tehnološki proces je uvijek isti. Kao primjer može se ukratko prikazati tehnologija valjanja blumova na blumingu čiji je raspored postrojenja prikazan na slici 69, a koji ima promjer valjaka 1150 mm. Ingoti mase 5..8 t dovezu se na vagonima iz čeličane i stave s pomoću kliještne dizalice u zagrijevne dubinske peći 1. Pošto se ingoti zagrijaju na potrebnu temperaturu (1150..1250 °C, zavisno od kvaliteta čelika) iz-

dizalicom i otprema vagonima. Pokraj noža postoji posebna jama 8 za otpatke pri obrezivanju blumova.



Sl. 70. Kalibri valjaka bluminga. Brojevi i strelice uz njih označuju redoslijed, broj i smjer provlaka

Valjanje slabova. Slabovi širine do ~1000 mm valjaju se na blumingu. Za valjanje slabova veće širine potrebno je imati slabing-bluming (bluming-slabing), ili univerzalni slabing, ili kratko *slabing*.

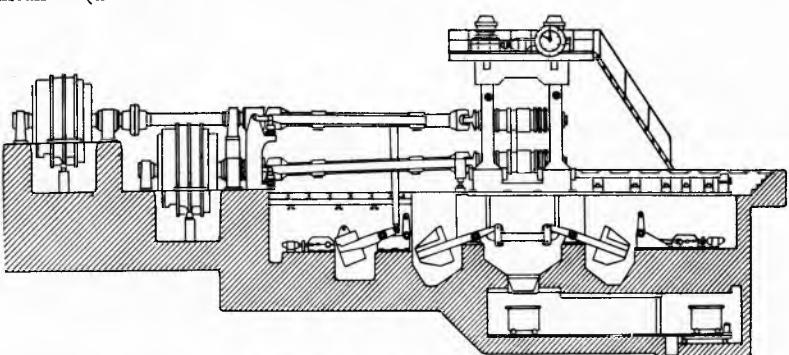
Konstrukcija slabing-bluminga razlikuje se od konstrukcije bluminga samo po tome što se valjci mogu više otvoriti (slika 71), tj. valjak se može podići na veću visinu (od 1000 do 2000 mm). Donji valjak je nepomičan, a gornji valjak se diže električki pogonjenim mehanizmom. Veće dizanje gornjeg valjka potrebno je da bi se slabovi mogli provlačiti među valjke okrenuti na bok. Naime

valjanje slabova razlikuje se od valjanja blumova po tome što se zbog veće širine slabova valjanje vrši sa manjim visinskim redukcijama, kako ne bi nastala prekomjerna opterećenja valjaka i pogonskih motora. Osim toga se valjani komad ne okreće poslije svake druge ili četvrte provlake, nego se u toku cijelog valjanja obično svega dva puta okreće na bok. Takve provlake slaba postavljenog na bok izvode se da bi se materijal obradio po bočnim stranama i da bi se regulisala širina slabova. Budući da se na bluming-slabingu valjaju ne samo slabovi nego i blumovi, valjci se kalibriraju tako da se pored glatkog dijela na valjcima nalazi još i jedan kalibar ili dva za valjanje blumova.

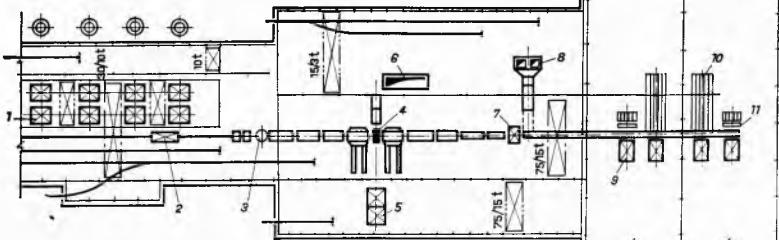
Bluming-slabing postoji u željezarama koje imaju

Tablica 2
PLAN PROVLAKE ZA VALJANJE BLUMOVA

Broj provlaka	Dimenzije presjeka	Broj kalibra	Δh	Δb
0	740 × 740			
1	650 × 740	90	0	
2	560 × 740	90	0	
3	660 × 565	I	80	5
4	580 × 570		80	5
5	495 × 575		85	5
6	410 × 580		85	5
7	495 × 420		85	10
8	410 × 430		85	10
9	365 × 420	II	65	10
10	300 × 430		65	10
11	350 × 312	III	80	12
12	270 × 325		80	13
13	280 × 280	IV	45	10



Sl. 71. Slabing-bluming 1100 mm



Sl. 69. Raspored postrojenja bluminga 1150 mm konstrukcije UZTM.

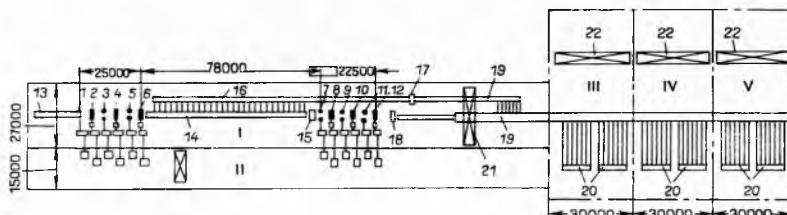
vade se istom kliještnom dizalicom i postave na kola za prevoz blokova (2). Kolima se ingoti dovlače do prijemne kotrljače na kojoj se nalazi okretni sto 3 s ugradenom vagom; na tom se stolu ingoti okreću i važu. Sa prijemne kotrljače ingoti idu na radnu kotrljaču 4 ispred valjačkog stana. Radna kotrljača se nalazi i iza stana. Svaki valjak u stanu pogoni se reverzirnim istosmjernim elektromotorom 5 snage 5000 KS i brojem okretaja 0..50..100 min⁻¹. Blok se propušta kroz valjke nekoliko puta, dok mu se presjek smanji koliko je potrebno. Prije svakog navedenog propuštanja kroz valjke, gornji se valjak spušta i valjanom ingotu se dalje smanjuje visina, a time i presjek, i to po pravilu koliko god najviše dozvoljava naprezanje u valjcima, zahvat komada valjcima i snaga pogonskih motora. Na valjcima se nalazi 4..5 otvora (kalibra) kroz koje se ingot provlači toliko puta i onim redoslijedom kako je to predviđeno u *planu provlaka* (shemski valjanja). Kako mogu izgledati valjci prikazano je na slici 70, a plan provlaka za valjanje blumova presjeka 280 × 280 iz ingota mase 7 t visokougličnog čelika prikazan je u tablici 2.

Za vrijeme valjanja, poslije dvije ili četiri provlake, ingot se okreće sa 90° s pomoću prevrtča koji se nalazi na linealima (u tablici je okretanje označeno strelicama). Ispred i iza stana su po dva lineala (manipulatora), koji, pored toga što se mogu pomicati uduž osi valjaka da bi premjestili valjani ingot od kalibra do kalibra, mogu se i primicati jedan drugom i razmjeniti jedan od drugog da bi služili za ravno vodenje valjanog komada prilikom valjanja. Izvaljani blum putuje po odvodnoj kotrljači do noža 7 (v. sliku 69) gdje mu se odrežu krajevi, a zatim se razreže na dužine potrebne s obzirom na daljnju preradu valjanjem ili kovanjem. Izrezani blumovi potiskuju se potiskivačem 9 na jednu rešetku, odakle se kranom skidaju ili prevlače do hladnjaka 10. Odgorak koji otpada sa ingota prilikom valjanja sakuplja se u jamu 6 i odatle se vadi

i profilne valjaonice i valjaonice lima. Ako postoje samo valjaonice lima, gradi se slabing za valjanje samo slabova. Ispred i iza horizontalnih valjaka slabing ima i glatke vertikalne valjke koji služe za bočnu obradu materijala i za regulisanje potrebne širine valjanih slabova. Raspored postrojenja je u sva tri slučaja (blumining, bluming-slabing i slabing) sličan.

Valjanje gredica i platina. Gredice i platine se danas valjuju ili na linijskim trio-prugama, ili na reverzibilnim duo-prugama, ili na kontinuiranim prugama.

Linijske pruge za valjanje gredica sastoje se od 2...4 valjačka stana postavljena jedan pored drugog. Takve pruge imaju osnovni promjer valjaka 500...900 mm, a na njima se gotovo uvijek valjuju ne samo gredice već i drugi polufabrikati (platine) i gotovi profili (razni šipkasti i fazonski profili). Zbog niske produktivnosti, ovaj sistem valjanja se upotrebljava više u valjaonicama kvalitetnih čelika a manje u valjaonicama običnih čelika.



Sl. 72. Raspored postrojenja kontinuirane pruge za valjanje gredica. I - Pružna hala, II - strojara, III, IV, V - skladišta polufabrikata. 1-6 Valjački stanovi sa valjcima 730 mm Ø, 7-12 valjački stanovi sa valjcima 530 mm Ø, 13 dovodna kotrljača, 14 međukotrljača, 15 nož (makaze), 16, 19 odvodne kotrljače, 17 nož 850 t, 18 letće makaze, 20 hladnjaci, 21 i 22 mosne dizalice

Na linijskim prugama gredice se valjuju češće iz ingota a rjeđe iz blumova. Ingoti se zagriju do potrebne temperature u dubinskim ili potisnim pećima, a blumovi u potisnim ili u nekim drugim pećima, i zatim propuštaju kroz valjke smanjujući razmak valjaka pri svakoj provlaci, sve dok se ne dobije potrebnii presjek. Izvaljani materijal se nožem ili pilom reže na potrebne dužine i prevlači do hladnjaka. Iz hladnjaka se materijal u poluvrućem stanju transportuje na druge pruge da se dogrije i dalje valja u gotove proizvode, ili se pušta da se ohladi, eventualno površinski očisti, pa tek onda dalje prerađuje u profilnim valjaonicama.

Valjanje gredica na reverzirnim duo-prugama promjera valjaka 600...900 mm savremen je način valjanja gredica u valjaonicama kvalitetnih čelika. Postrojenja su slična normalnim bluminzima za valjanje blumova, samo su lakše konstrukcije. Gredice se valjuju na tim prugama iz ingota mase 1,5...4 t. Kapacitet takvih pruga je 200...600 kt izvaljanog materijala godišnje.

Za veliku proizvodnju polufabrikata upotrebljavaju se kontinuirane valjačke pruge sastavljene od nekoliko duo-stanova koji su postavljeni jedan iza drugog (slika 72). Komad prolazi kroz svaki stan samo jedanput i nalazi se istovremeno u više stanova. Promjeri valjaka se postepeno smanjuju od prvog do posljednjeg stana, a brzine povećavaju. Sa povećanjem broja stanova povećava se i kapacitet pruge. Ove se pruge postavljaju iza noža na blumingu, tako da se nakon obrezivanja blumova nastavlja njihovo valjanje na kontinuiranoj pruzi.

Platine se mogu valjati na svim prugama na kojima se valjuju gredice, a najčešće se valjuju na linijskim trio-prugama jer su potrebne količine platina obično male.

Otpadak i škart pri valjanju polufabrikata. Pri valjanju polufabrikata iz ingota nastaje otpadak, i to: odgorak u peći pri zagrijavanju materijala 1...2%, odgorak na pruzi pri valjanju 1...2% i odresci koji iznose 5...15%, zavisno od toga da li se valja neumireni ili umireni čelik. Tome treba dodati još i gubital materijala koji nastaje ako se polufabrikat podvrgava čišćenju. Tako je izvadak polufabrikata iz ingota od neumirenog čelika 89...92%, a od umirenog čelika 79...82%.

Pri samom valjanju mogu nastati različiti defekti na valjanom materijalu: uvrnuti, nedovaljani, spaljeni komadi i različite površinske greške (prskotine, ogrebotine, ljuskavost itd.). Površinske greške sa izvaljanog polufabrikata mogu se odstraniti pogodnim postupcima. Ako su defekti veći, materijal se mora odbaciti kao škart.

Pri valjanju profila od nekog ugljičnog čelika površinske greške se ne odstranjuju ako nisu jako duboke, tvrdi materijal,

pak, a pogotovo ako je legiran, i materijal koji je namijenjen valjanju limova, makar bio i meki čelik, podvrgava se površinskom čišćenju. Mekši čelici čiste se plamenom acetilena, butana ili koksnog plina pomoću posebnih aparata, tvrdi i legirani čelici čiste se struganjem (glodanjem) tanjeg površinskog sloja na posebnim strojevima ili brušenjem brusilicama, a dublji površinski defekti odstranjuju se pneumatskim dlijetima.

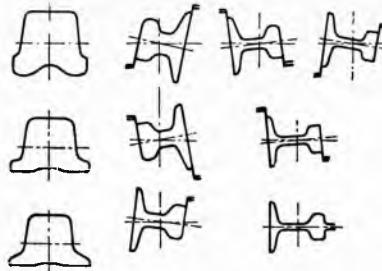
Valjanje profila

Profili proizvedeni valjanjem dijele se prema obliku presjeka na šipkaste (profile prostog geometrijskog oblika) i fazonske, a prema težini na lake, srednje i teške. Valjaonice u kojima se valjuju profili, valjana žica i trake širine do 500 mm zovu se profilne valjaonice. Prema osnovnom promjeru valjaka, tj. prema razmaku između osi dva susjedna valjka kada su valjci novi, odnosno prema razmaku između osi dva susjedna grebenjaka u prenosnom stanu na posljednjoj, završnoj grupi stanova, ove pruge se dijele na sitne, srednje, krupne i teške: teške pruge imaju $D_0 = 750\cdots900$ mm; krupne pruge $D_0 = 550\cdots750$ mm; srednje pruge $D_0 = 350\cdots550$ mm; sitne pruge $D_0 = 250\cdots350$ mm; žične pruge $D_0 = 250\cdots300$ mm. Pruge za uske trake imaju dužinu radne obline valjaka $L = 400\cdots600$ mm.

Svaka od navedenih pruga ima više valjačkih stanova, koji mogu biti različito raspoređeni. Prema rasporedu valjaka pruge se dijele na linijske, kontinuirane, polukontinuirane, kros-kontri ili paralelne i cikcak-pruge ili ševuljične. Linijske pruge imaju stanove poredane jedan pored drugog, a broj stanova se kreće od 2 do 9. Teže pruge imaju manji, a lakše pruge veći broj stanova. Ove pruge mogu se sastojati od jedne, dvije ili više linija (stepenaste pruge). Kontinuirane pruge imaju nekoliko stanova, a razmak između stanova je manji od dužine valjanih komada, tako da se komad nalazi istovremeno u više stanova. Polukontinuirane pruge imaju jednu grupu stanova linijskog, a drugu grupu kontinuiranog tipa. Kros-kontri ili paralelne pruge imaju nekoliko stanova poredanih jedan iza drugog u dva ili tri paralelna reda, a razmak između stanova se postepeno povećava kako se povećava dužina valjanog komada. Cikcak-pruge ili ševuljične pruge slične su naprijed opisanim prugama, samo su u njima posljednji stanovi (njih četiri ili pet) postavljeni u dva reda na ševuljicu (u cikcaku).

Linijske pruge su obično izgradene kao trio-pruge (sa po 3 valjka u svakom stanu, a katkada na nekim stanovima mogu biti ugradena po dva valjka: duo-stanovi), te se na svakom stanu izvodi po nekoliko provlaka. Sve ostale navedene pruge izgradene su kao duo-pruge (po dva valjka u svakom stanu) i kroz svaki valjački stan komad prolazi samo jedanput.

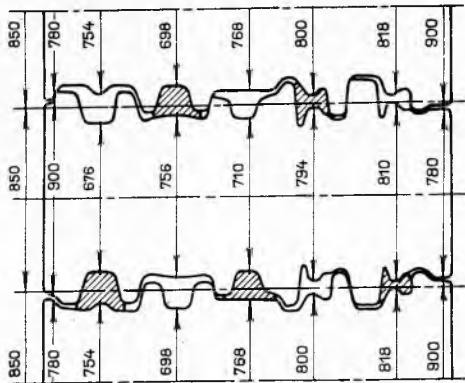
Na svim prugama za valjanje profila valjci su kalibrirani, sa urezanim žlebovima po radnoj oblini. Kada se postave dva valjka jedan iznad drugog, žlebovi u jednom i u drugom valjku čine kalibre. Kalibri su po obliku i veličini različiti, zavisno od oblika



Sl. 73. Postepeno mijenjanje presjeka pri valjanju šine. Redoslijed je odozgo dolje, slijeva nadesno

i veličine izvaljanog profila. Konstrukcija kalibara pojedinačno i zajedno sa valjcima čini kalibraciju (kalibriranje) valjaka. Kalibraciju izrađuje kalibrer (konstruktor kalibracije) za svaki profil posebno. Iako se kalibracija osniva na matematičkoj i fizičko-hemijskoj analizi plastične deformacije, ipak za uspješnu izradu

kalibracije potrebno je i dugogodišnje iskustvo u toj oblasti. Kalibracija jednog profila ispunjava svoj zadatak ako omogućava dobijanje profila koji po obliku, dimenzijama i mehaničkim osobinama odgovara propisima standarda, a uz što brži režim deformacije, da bi se za što kraće vrijeme izvaljao profil i tako postigla maksimalna proizvodnja na dotičnoj pruzi. Kao primjer, na sl. 73 prikazano je postepeno mijenjanje presjeka polufabrikata pri valjanju jedne šine, a na slici 74 kalibrovani valjci pr-



Sl. 74. Kalibrovani valjci za valjanje šine iz sl. 73

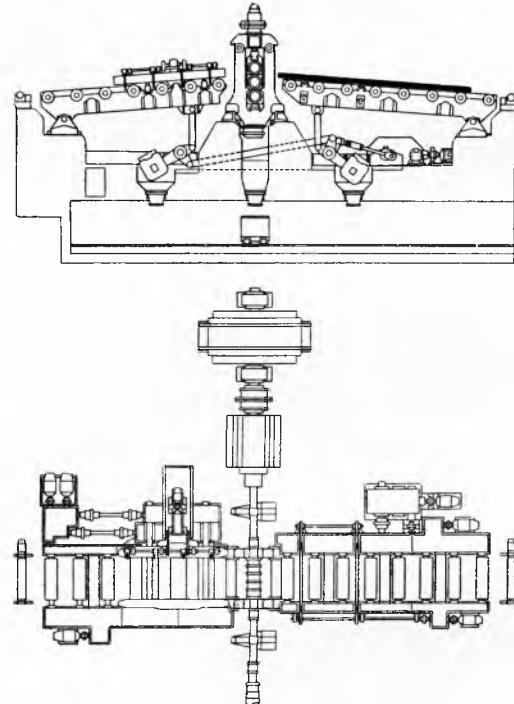
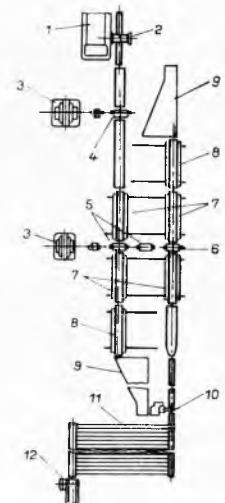
vog stana za valjanje te šine. Svi se profil valjavaju iz početnih polufabrikata kvadratnog ili pravokutnog presjeka i to ili iz blumova ili iz gredica, a ponekad, u starim valjaonicama, i iz ingota. Valjanim komadima se postepeno smanjuje presjek tako da on ostaje obično iz početka i dalje kvadratan ili pravokutan, a u posljednjim kalibrima (njih 5–15, zavisno od oblika i veličine profila) presjek se oblikuje tako da se sve više i više približava konačnom obliku. U posljednjem, tzv. završnom kalibru dobije presjek konačan oblik koji odgovara obliku propisanog profila u vrućem stanju. Kada se komad ohladi, dobija se profil sa konačnim dimenzijama.

U savremenim visokoproduktivnim valjaonicama profili se valjavaju iz polufabrikata (blumova i gredica). Radi povećanja produktivnosti pruge nastoji se da se polufabrikat učini što težim, i to više na račun dužine a manje na račun presjeka. U starim niskoproduktivnim valjaonicama običnih čelika, gdje ne postoji bluming, mnogi se profili valjavaju direktno iz ingota. U valjaonicama legiranih čelika, s obzirom na njihovu strukturu i manje kapacitete, profili se valjavaju bilo direktno iz ingota bilo tako da se na prvim (pripremnim) stanovima ingoti izvaljaju u polufabrikat, zatim polufabrikat površinski očisti, zagrije i valja u gotov proizvod. Iz nekih vrsta legiranih čelika, s obzirom na njihova plastična i strukturna svojstva, profili se valjavaju u nekoliko faza, a između svaka dva valjanja materijal se ponovo zagrije. Valjanjem iz blumova postiže se veća produktivnost pruge, ali je potrebno izgraditi bluming ili agregat za kontinuirano livenje. To povećava investicije ali i znatno povećava kapacitet valjaonica u cijelini. Prije izgradnje valjaoničkih kapaciteta i izbora tehnologije svakako treba provesti detaljniju tehničko-ekonomsku analizu osnovanu na trenutnim i perspektivnim potrebama za dotičnim assortimanom, na stepenu korištenja postrojenja i brzini zastarjevanja postrojenja i tehnoloških procesa, kako bi se u odnosu na svjetske pokazatelje dobita što veća i jeftinija proizvodnja po kilogramu ugrađene opreme, po kvadratnom metru valjaoničke površine i po jednom zaposlenom čovjeku.

Valjanje teških profila. Teški profili, šipkasti i fazonski, valjavaju se na teškim i krupnim linjskim prugama koje imaju 2–4 valjačka stana.

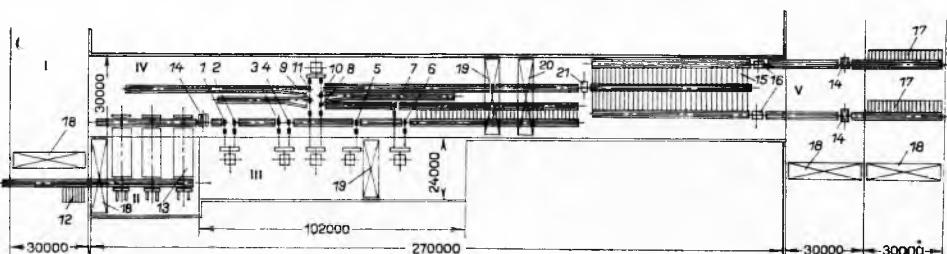
Profili se valjavaju iz ingota mase 1–3 t, koji se prethodno za-

griju u dubinskoj ili u potisnoj peći, ili iz blumova mase 0,5–4 t zagrijanih u potisnoj peći. Na prvom stanu se u nekoliko provlaka ingotima ili blumovima valjanjem smanjuju presjeci na određenu veličinu koja zavisi od oblika i veličine konačnog profila. Zatim se valjani komadi prevlačnicima prevlače na drugi i na treći stan, gdje se u nekoliko provlaka valjanjem komadima dalje smanjuje presjek i daje određeni profil. Poslije toga se komadi prevlače na posljednji (završni) stan, gdje u jednoj ili dvije provlake valjani profili dobijaju konačan oblik. Izvaljani profili se pilama obrežu na krajevima i izrežu na valjačke dužine, zatim se ohlade na hladnjacima, ravnaju, pregledaju, sortiraju, signiraju i otpremaju. Godišnji je kapacitet takvih valjaonica 200–400 kt izvaljanih profila, zavisno od assortmana i stepena mehanizacije.

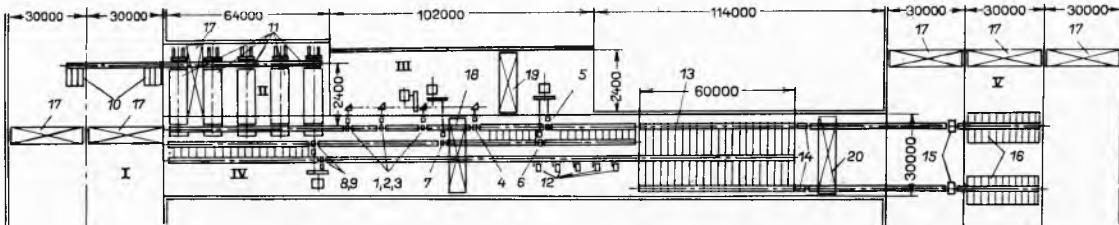


Sl. 76. Podizni stolovi sa linealima i prevrtaćem na pripremnom stanu teške profilne pruge

Savremene teške i krupne profilne valjaonice podijeljene su u dvije, a neke i u tri linije. Prvu liniju čini reverzirni duo-stan (bluming) promjera valjaka 800–1000 mm, drugu liniju tri stana



od kojih su dva trio, a treći (završni) je duo (slika 75). Ako postoji i treća linija, nju čini samo jedan završni duo-stan. Ispred i iza pripremnih stanova nalaze se podizni stolovi (slika 76) i ostala potrebna mehanizacija. Krupne pruge imaju sličan raspored postrojenja, samo su manjih dimenzija. Kapacitet savremenih teških pruga je $\sim 1,5$ Mt, a krupnih ~ 1 Mt godišnje.



Sl. 78. Raspored postrojenja kros-kontri pruge 500 mm. I Skladište polufabrikata, II pećna hala, III strojara, IV pružna hala, V skladište gotove robe. 1...4 Pripremni valjački stanovi 630 mm, 5...9 pripremni i završni valjački stanovi 530 mm, 10 rešetke, 11 zagrijevne potisne peći, 12 pile, 13 hladnjak, 14 ravnalice, 15 noževi, 16 sakupičači, 17...20 dizalice

Valjanje srednjih profila. Srednji profili valuju se na srednjim prugama i to: linijskim, ševeljičnim (cikcak-) i kros-kontri-prugama. Najstarije su linijske pruge sa 4...5 stanova. Upotrebljavaju se i danas u valjaonicama legiranih čelika, a i za valjanje ugljičnih čelika ako se zahtijeva širok assortiman i ne previelik kapacitet. Pruge se sastoje od jedne ili više linija. Godišnji kapacitet pruge se kreće od 100 do 250 kt, zavisno od assortmana profila, rasporeda stanova, dimenzija početnog polufabrikata i promjera valjaka. Za valjanje se upotrebljavaju mali ingoti i polufabrikati mase 200...1000 kg.

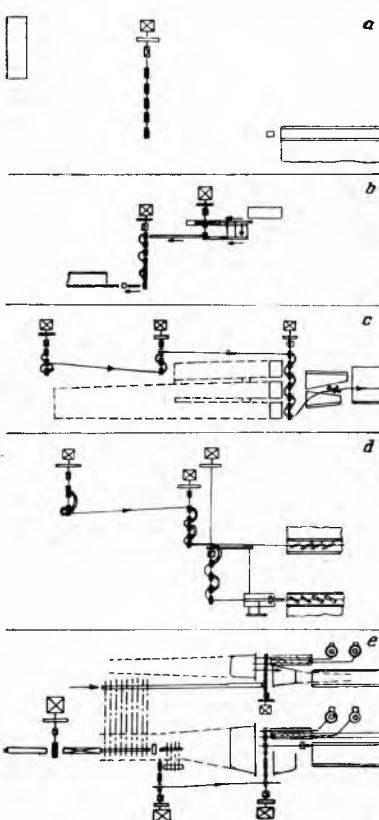
Za veću proizvodnju u valjaonicama ugljičnih čelika i masovnih profila upotrebljavaju se ševeljične pruge (slika 77) i kros-kontri-pruge (slika 78). Za valjanje profila na tim prugama služe blumovi i gredice presjeka 80×80 do 200×200 mm i dužine 5...10 m. Kako se vidi iz sheme rasporeda postrojenja, pruge imaju po nekoliko duo-stanova, a kroz svaki stan valjani komad prolazi samo po jedanput. Polufabrikat se zagrijava u potisnim

pećima kapaciteta 20...100 t/h uloška. Izvaljani materijal se reže pilama, hlađi na hladnjacima, rjava na ravnalicama, zatim pregleda, pakuje i otprema za prodaju. Godišnji kapacitet cikcak-pruge je ~ 500 kt, a kros-kontri pruge ~ 1 Mt izvaljanih profila.

Valjanje sitnih profila i žice. Sitni profili valuju se na sitnim prugama, i to na linijskim prugama sa 5...9 stanova u jednoj liniji, stepenastim sa više linija, zatim na cikcak-prugama (ševeljičnim), polukontinuiranim i kontinuiranim prugama. Na svim ovim prugama profili se valjuju iz gredica presjeka 70×70 do 150×150 mm, dužine 4...12 m; jedino na linijskim prugama još se po negdje upotrebljavaju mali ingoti.

Najstarije su linijske pruge, a i danas imaju široku upotrebu u malim željezarama, naročito u željezarama legiranih čelika. Pruge

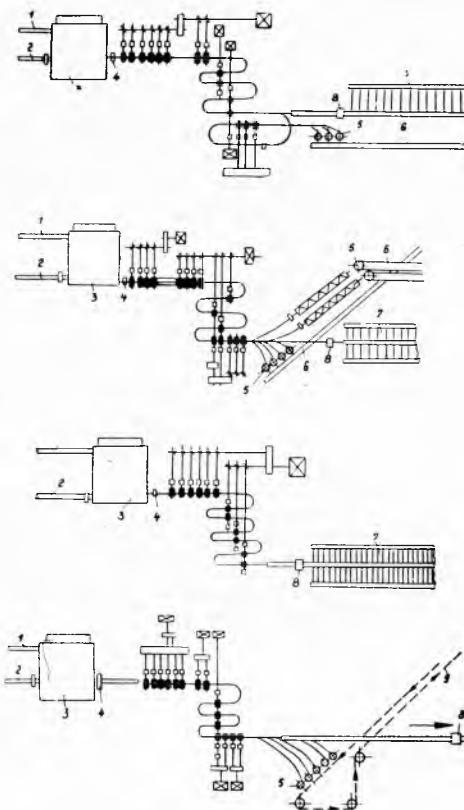
se obično sastoje od više linija (slika 79), ili su po svom tehničkom procesu vezane sa srednjim linijskim prugama. Izvaljani materijal se adjustira na sličan način kao i srednji profili. Kapacitet ovih pruga je vrlo različit i uglavnom zavisi od stepena mehanizacije, te se kreće od 20 do 300 kt izvaljanih profila godišnje.



Sl. 79. Linijske sitne profilne pruge. a) Jednolinijska, b) dvolinijska, c) i d) trolinijska, e) dvojne linijske pruge koje imaju prvu liniju (pretprugu) zajedničku

Polukontinuirana sitna pruga shematski je prikazana na slici 80. Ove pruge obično su kombinovanog tipa, tj. one imaju osim hladnjaka još i namotače, tako da se profili nakon valjanja transportuju na hladnjak ili se namotavaju na namotačima ako se valjica ili tanki betonski čelik. Pruge imaju 15...20 stanova. Godišnji kapacitet se kreće od 150 do 300 kt izvaljanih profila.

Cikcak (ševeljične) sitne pruge po konceptciji su jednakе srednjim prugama ovog tipa, sa razlikom da imaju promjer valjaka na posljednjem (završnom) stanu 300...350 mm, a na ostalim stanicima promjer se valjaka povećava idući od posljednjeg do prvog,

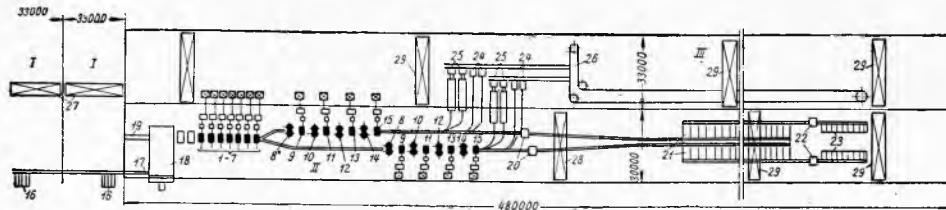


Sl. 80. Polukontinuirane sitne pruge. 1 Potiskivač, 2 istiskivač, 3 peć, 4 nož, 5 namotač, 6 transporter, 7 hladnjak, 8 letce makaze, 9 viselučna pruga (transporter)

na kojem dostiže 400...450 mm. I na polukontinuiranim prugama, pa i na linijskim prugama koje se sastoje od više linija, prvi stanovi imaju veće promjere valjaka od završnih. Cikcak-prugama može prva grupa stanova biti kontinuirana, te se takve pruge zovu polukontinuirane cikcak-pruge. Ove su pruge također kombinovane, tj. snabdjevane i hladnjakom i namotačima, te izvaljani profili mogu biti i u šipkama i u koturovima. Namijenjene su

dakle za širok assortiman, a godišnji im se kapacitet kreće od 150 do 300 kt izvaljanih profila.

Sitni profili valjaju se također na kontinuiranim prugama sa ukupno 15...20 stanova. Takve su pruge podijeljene u više grupa, a svaka grupa može da ima različit broj stanova. Profili na kontinuiranim sitnim prugama valjaju se iz gredica presjeka 80×80 do 100×100 mm, dužine 9...12 m. Gredice se prije valjanja zagrijavaju u potisnoj peći. I ove se pruge mogu graditi kao kombinovane, tj. za valjanje profila u šipkama i u koturovima.



Sl. 81. Raspored postrojenja kontinuirane sitne pruge 250 mm. I Skladište polufabrikata, II pružna hala, III skladište gotove robe; 1...7 pripremni duo-stanovi 370 mm, 8...12 stanovi završne grupe 320 mm, 13...15 stanovi završne grupe 270 mm, 16 rešetke, 17 potiskivač, 18 potisna peć, 19 istiskivač, 20 leteće makaze, 21 hladnjak, 22 noževi, 23 sa-kupljači, 24 namotači žice, 25 namotači trake, 26 viseća pruga, 27...29 dizalice

Brzina valjanja na posljednjem stanu dostiže 20 m i više. Postoje različite koncepcije ovih pruga, a jedna od njih prikazana je na slici 81. Kapacitet kontinuiranih pruga je 300...600 kt izvaljanih profila godišnje, a u SSSR se predviđa izgradnja takvih pruga sa godišnjim kapacitetom od 1,5 Mt valjanih profila.

Izvaljani profili na svim sitnim prugama režu se, hlađe na hladnjacima, zatim ponovo režu u hladnom stanju, pregledaju, sortiraju i otpremaju. Ako se profili valjaju u koturovima (žica i tanki betonski čelik), koturovi se hlađe na visećoj pruzi, vežu, signiraju i otpremaju kao i šipkasti profili.

Valjana žica predstavlja okrugle profile promjera 5,5...10 mm koji se poslije izlaza iz posljednjeg stana namotavaju na namotače. Sa namotača se koturovi žice potiskuju na transporter, a sa ovog nabacuju na viseću prugu gdje se ohlade do $\sim 50^{\circ}\text{C}$, zatim se skidaju, vežu, signiraju i otpremaju. Žica se može valjati na svim sitnim prugama ako imaju dovoljan broj stanova i ako su opremljene namotačima. Žične kontinuirane pruge namijenjene samo valjanju žice imaju 17...25 stanova, 4...12 namotača, bez hladnjaka su, brzina na posljednjem stanu dostiže 35 m/sek. Predviđa se izgradnja kontinuiranih žičnih pruga s brzinom do 60

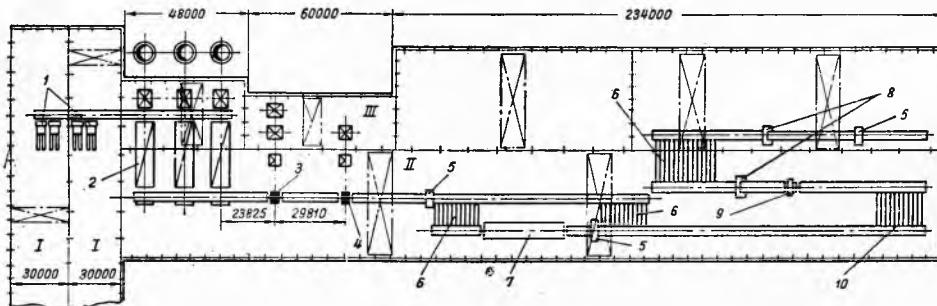
oblik poprečnog presjeka. Površinske greške jesu: ljskavost, popucanost, ogrebotine, prevaljanost i dr. Ljskavost može da bude posljedica slabe površine ingota ili nepravilnog navarivanja, odnosno nasjecanja, valjaoničkih valjaka. Uzrok popucanosti može biti slaba plastičnost materijala, nepravilno zagrijavanje čelika prije valjanja, nepravilna kalibracija valjaka i prevaljanost materijala za vrijeme valjanja. Ako su ti defekti plići, mogu se odstraniti brušenjem, a ako su dublji, materijal se odbacuje kao škart. Neodgovarajuće mehaničke osobine mogu biti posljedica

neodgovarajućeg kvaliteta čelika, nepravilne kalibracije i nepravilnog vođenja procesa valjanja. Ako oblik i dimenzije profila odstupaju od propisanog standarda, to može biti posljedica nepravilne kalibracije i nepravilnog vođenja procesa valjanja. Osim toga zbog nepravilnog valjanja profil može biti uvrnut ili tako iskrivljen da se ne može ravnanjem popraviti.

Valjanje limova

Limovi se dijele prema debljini na tanke (fine) limove debljine ispod 3 mm, srednje limove debljine 3...4,75 mm, debele limove debljine od 5 do preko 60 mm. Obično se limovi debljine iznad 60 mm nazivaju čeličnim pločama. Limovi imaju širinu iznad 500 mm, i to tanki (fini) široki su do 1250 mm, srednji do 2500 mm a debeli do 3600 mm. Ponekad debeli limovi dostižu širinu do 5000 mm. Po nekim standardima, npr. po sovjetskim, limovi se dijele na tanke do 4 mm i debele iznad 4 mm.

Valjanje debelih limova. Debeli limovi valjaju se iz ingota pravokutnog presjeka (brama) i slabova na trio-, duo- i kvarto-prugama koje se sastoje od jednog ili dva stana. Valjanje iz slabova bolji je način nego valjanje iz brama jer se slabovi prije



Sl. 82. Raspored postrojenja valjaonice sa dva stana 2250 mm za valjanje debelih limova. I Skladište slabova, II pružna hala, III strojara. 1 Uredaji za nalaganje slabova, 2 zagrijevne potisne peći, 3 pripremni reverzirni duo-stan, 4 završni kvarto-stan, 5 ravnalica, 6 lancani prevlačnici, 7 peć za normalizaciju, 8 noževi (makaze), 9 nož, 10 kontrolna rešetka

m/sek. Godišnji kapacitet je 200...700 kt izvaljane žice. Na takvim prugama valjaju se istovremeno po dva, tri ili četiri komada, te se zovu dvožilne, trožilne i četverožilne. Pruge su podijeljene u više grupa. U prvim grupama su svi stanovi horizontalni (sa horizontalnim valjcima), u završnim grupama stanovi mogu biti također svi horizontalni, ili su naizmjenično postavljeni horizontalni i vertikalni stanovi.

Valjana žica i šipkasti čelik mogu se nakon vrućeg valjanja podvrići vučenju u hladnom stanju da bi se postigao bolji kvalitet u pogledu površine i mehaničkih svojstava.

Greške na valjanim profilima. Na valjanim profilima mogu da se pojave ove greške: površinske greške, neodgovarajuće mehaničke osobine, neodgovarajuće dimenzije i neodgovarajući

zagrijavanja površinski očiste te se dobije čistija površina izvaljanih limova. Iz brama se valjaju lakši limovi širine obično do 2000 mm.

Za manju proizvodnju upotrebljava se pruga koja se sastoji od jednog stana, a za veću proizvodnju pruge od dva stana. *Lautov trio-stan* je stan kojem srednji valjak ima najmanji promjer i nije pogonjen. Kvarto-stan ima četiri valjka u istoj ravni jedan iznad drugog; dva su srednja valjka manjeg promjera i pogonjena, a druga dva — gornji i donji — zovu se potporni valjci, većeg su promjera od radnih valjaka i nisu pogonjeni. Širina valjanih limova zavisi od dužine radne obline valjaka i manja je za ~ 200 mm od radne dužine valjaka. Valjanjem na prugama sa dva stana (jedan iza drugog) postiže se veća proizvodnja i bolji kvalitet

površine valjanih limova, jer se u tom slučaju upotrebljavaju na prvom stanu čelični valjci, a na drugom stanu valjci od tvrdog livenog gvožđa (sl. 82).

Pri procesu valjanja limova materijal se najprije provuče među valjke uzdužno jedan ili dva puta, zatim nekoliko puta pod uglom da bi se dobila potrebna širina lima iz širine slaba ili brama, a daljnje provlakse se opet izvode uzdužno. Slab ili brama se može uvoditi u valjke i poprečno, ali tada nastaju veća opterećenja valjaka. Samo uzdužno se slab ili brama uvodi ako širina lima nije veća od širine slaba (brame).

Izvaljani limovi moraju imati čistu površinu, te se stoga odgorak odstranjuje milazom vode pod pritiskom 60–100 at, a u savremenim valjaonicama dograđen je i poseban mali vertikalni ili horizontalni stan sa hravapim valjcima koji razdrobe odgorak na površini izvaljanih limova. U starim valjaonicama odgorak se uklanja tako da se po limu bacaju brezove grane, a zatim se površina pomete brezovom metlom.

Zagrijani limovi se valjuju a zatim ravnaju, obrezuju i razrežu na potrebne dužine.

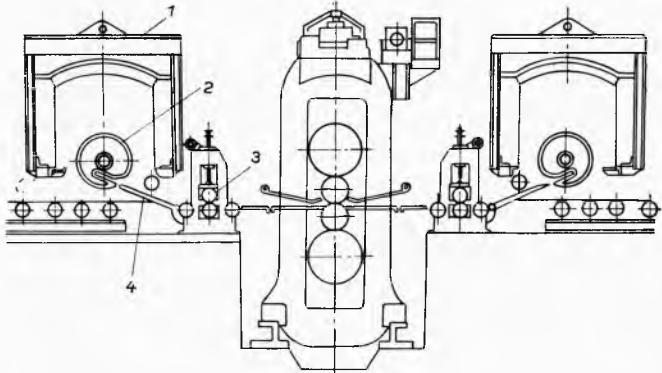
Pri valjanju mogu na debelim limovima nastati različiti defekti. Nejednolikost debljine lima po širini i dužini posljedica je istrošenosti valjaka, nejednake temperature valjanog komada i ukošavanja valjaka. Zbog istih razloga lim katkada srpskovo ili valovito izlazi iz valjaka. Osim toga na limovima se mogu pojaviti površinski defekti ako kvalitet ingota ne odgovara, ako odgorak nije odstranjen ili ako su valjci istrošeni.

Valjanje tankih limova. Tanki limovi valjuju se na duo-prugama, polukontinuiranim i kontinuiranim prugama.

Valjanje na duo-prugama je niskoproduktivno, ali se još uviđe upotrebljava svadgje u svijetu. Pruga se sastoji od 2–4 duo-stana postavljena u jednu liniju (jedan pored drugog). Promjer valjaka je 650–700 mm, a dužina radne obline 750–1700 mm. Nešto su bolje valjaonice koje imaju jedan Lautov trio-stan i iza njega dva duo-stana. Lautov trio-stan ima u tom slučaju valjke dužine 1000–2000 mm, promjer gornjeg i donjeg je 800–850 mm, a srednjeg 450–550 mm. Na takvim prugama se valjuju limovi debljine 0,25–5 mm. Za valjanje služe platine širine 300–400 mm, debljine 6–25 mm i dužine ~1040 mm. Ako postoji trio-stan, debljina je do 50 mm. Platine se zagrijavaju u potisnoj peći. Na prvom stanu platine se valjuju poprečno (iz dužine platine dobije se širina lima) u table lima debljine 4–5 mm, a zatim se nastavlja valjanje na duo-stanovima. Limovi debljine do 2 mm valjuju se pojedinačno, a tanji u paketima, tj. po više limova zajedno.

Izvaljani limovi (i rastavljeni ako su valjani u paketu) žare se u žarnim pećima, zatim obrezuju na makazama (noževima), a onda dresiraju, tj. u hladnom stanju propuštaju kroz polirane valjke uz malu redukciju (0,25–3%), da bi se dobile glatke površine limova.

Valjanje na kontinuiranim i polukontinuiranim prugama omogućava visoku proizvodnost, limovi su čiste površine, malen je otpadak i visok izvadak izvaljanih limova. Ove pruge se sastoje od pripremne i završne grupe. Pripremnu grupu kontinuirane pruge čini 3–5 horizontalnih i 3–5 vertikalnih stanova ili 3–4 univerzalna stana (slika 83), na polukontinuiranim prugama pripremnu grupu čine jedan ili dva stana sa horizontalnim i jedan ili dva sa

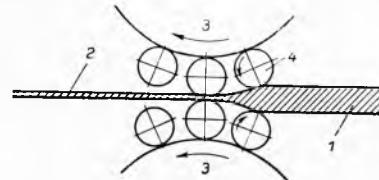


Sl. 84. Reverzirna kvarto-pruga sa pećnim namotačima (Stakel-pruga) za vrucje valjanje limova u trakama. 1 Peć, 2 namotač, 3 vučni valjci, 4 skretnica

vertikalnim valjcima, a najčešće samo jedan univerzalni stan. Završna grupa obiju pruga sastoji se od 5–7 stanova. Svi su stanovi ovih pruga kvarto-stanovi, a dužina valjaka je 1200–2500 mm. Ispred završne grupe nalaze se leteće makaze (koje mogu rezati komad u pokretu) za rezanje prednjeg kraja, a iza pruge su također leteće makaze za eventualno razrezivanje čeličnih traka na potrebne dužine. Pri izlazu iz pruge čelične trake se namotavaju u koturove na namotačima ugrađenim u odvodnoj kotrljači. Koturovi se odvoze u hladnu valjaonicu na daljnju preradu, ili se na posebnim režićim linijama režu u table lima zahtijevanih dimenzija.

Takve čelične trake valjuju se iz slabova debljine 70–300 mm, širine do 2000 mm, dužine do 9 m i težine do 30 t, a obično do 14 t.

Na ovim prugama mogu se valjati čelične trake debljine od 1,3 do 10 mm. Brzina valjanja na posljednjem stanu iznosi do

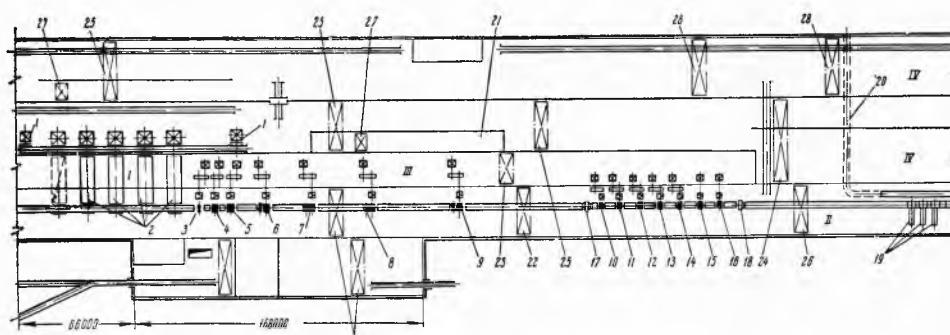


Sl. 85. Valjci planetne (Sendzimir-) pruge.
1 Slab, 2 traka, 3 potporni valjci, 4 radni valjci

20 m/sek. Godišnji kapacitet pruge zavisi od broja stanova, od dimenzije valjaka i od širine i težine izvaljanih limova, kreće se od 1 do 7 Mt izvaljanih limova, odnosno traka.

Na reverzirnim prugama sa pećnim namotačima (Stakel-prugama) valjuju se limene trake tako da se materijal najprije nekoliko puta propusti kroz reverzirni duo- ili kvarto-stan, a onda, kad se traka dovoljno stanji, ona se na izlazu iz valjaka namotava na namotače koji se nalaze u pećima ispred i iza stana (slika 84). Traka se naizmjeno namotava u jednoj i razmotava u drugoj peći. Na ovim prugama mogu se valjati čelične trake debljine 1,5–10 mm, širine 700–1500 mm. Trake se mogu naknadno rezati u table lima. Kapacitet pruge je oko 300 kt izvaljanih limova godišnje, a za veći kapacitet i bolji kvalitet limova postoje pruge sa još jednim reverzirnim duo-stanom ispred pomenutog reverzirnog stana.

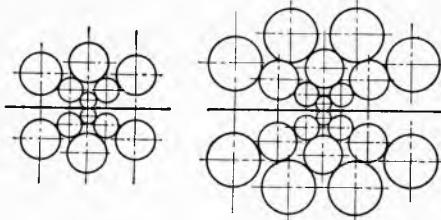
Planetne (Sendzimir-) pruge imaju valjačke stane posebne konstrukcije; na potpornim valjcima većeg promjera (~500 mm) nalazi se veći broj radnih valjaka malog promjera (~50 mm) (slika 85). Takva konstrukcija stana omogućava da se u jednoj provlaci reducira visina valjanog materijala za 90–95%. Ovaj način valjanja malo se primjenjuje. Pri valjanju tankog lima na njemu mogu nastati



Sl. 83. Raspored postrojenja kontinuirane valjaonice 1700 mm za valjanje limova u trakama. I Pećna hala, II pružna hala, III strojara, IV sklođe gotove robe. 1 Uredaji za nalaganje slabova, 2 zagrijevne potisne peći, 3 vertikalni stan, 4, 10 lomilice odgorka, 5 pripremni kvarto-stan, 6–9 pripremni univerzalni valjački stanovi, 11–16 završni kvarto-stanovi, 17 leteće makaze za obrezivanje krajeva, 18 leteće makaze za rezanje traka, 19 namotači, 20 transporter koturova, 21 rešetke za čišćenje slabova, 22–28 dizalice

različiti defekti, npr. slaba površina zbog uvaljanog odgorka ili istrošenih valjaka; valovitost lima također zbog istrošenih valjaka, slabe mehaničke osobine zbog neodgovarajućeg režima valjanja itd.

Hladno valjanje limova i traka. Čelični limovi i trake, prethodno vruće izvaljani, ohladeni na normalnu (sobnu) temperaturu, podvrgnu se u tom stanju dalnjem valjanju koje se stoga zove hladno, iako se materijal, zavisno od stepena deformacije i brzine valjanja, pri tom zagrije i do 200 °C. Hladnim



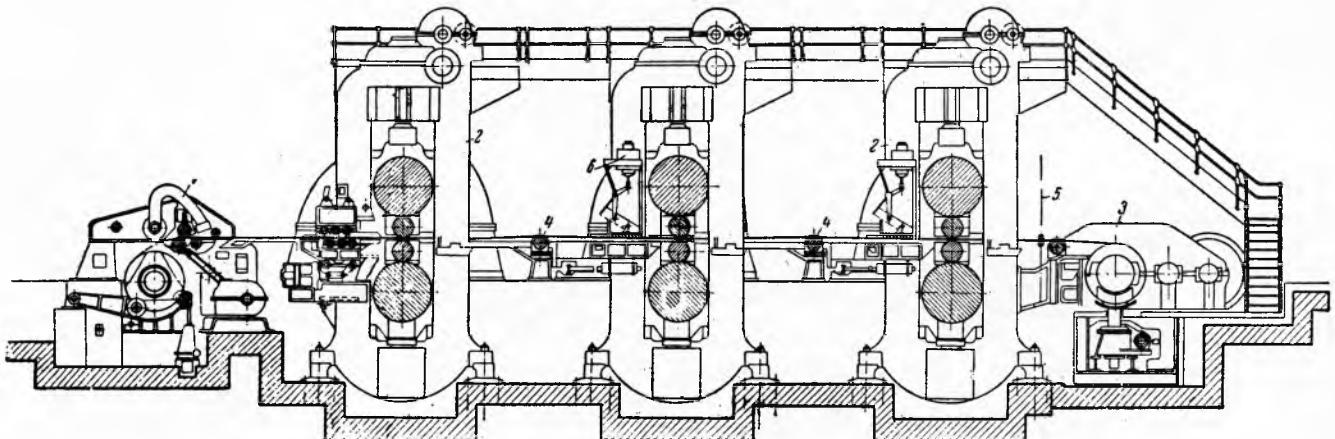
Sl. 86. Položaj valjaka u viševaljačnim stanovima

valjanjem dobivaju se limovi i trake male debljine (od 0,002 do 1,5 mm, što se ne bi moglo dobiti vrućim valjanjem), ravnomjerne debljine po širini i dužini, glatke i čiste površine i odličnih mehaničkih i tehnoloških svojstava. Zbog dobrih svojstava hladno valjani lim sve se više upotrebljava u industriji i sve više potiskuje iz upotrebe vruće valjani crni lim debljine do 3 mm.

Limovi se hladno valjuju na duo-, kvarto-, seksto-prugama i na mnogovaljačnim tzv. planetnim prugama (slika 86). Duo-

table lima dekapirane na jednostavan način u kadama valjuju se pojedinačno ili u paketima na duo-prugama. Valjanje se izvodi u nekoliko provlaka. Izlužene trake prenose se u koturu i valjuju bilo na reverzirnom kvarto-stanu bilo na jednosmernoj kontinuiranoj pruzi sa 3 ili 5 stanova. Pri valjanju na reverzirnom kvarto-stanu poslije svake provlake pruga se reverzira i lim se valja u suprotnom pravcu; pri valjanju na kontinuiranoj pruzi valjanje se vrši samo u jednom pravcu. Broj provlaka zavisi od zahtijevane debljine lima. Budući da pri hladnom valjanju materijal očvrsne, to se pri valjanju mješavina nakon zbirne redukcije visine za 60–80%, a pri valjanju tvrdih čelika i nakon znatno niže zbirne redukcije, mora provesti tzv. *međužarenje* da bi materijal omekšao. Prema tome, broj valjanja i broj žarenja između pojedinih valjanja to je veći što se valja tanji lim (traka) iz prethodno vruće izvaljane i dekapirane (lužene) trake odredene debljine. Katkada, da bi se postigla što čišća površina hladno valjanog lima, lim se po drugi put luži u toku valjanja. Hladno izvaljane trake se podvrgavaju posljednjoj termičkoj obradi, a nakon toga dresiraju. Dresiranju se podvrgavaju limovi i poslije vrućeg i poslije hladnog valjanja.

Izrada bijelog i pocinkovanog lima. Da bi se zaštitali od korozije, neki se predmeti izrađuju od bijelog ili pocinkovanog lima, tj. od lima čija je površina prevučena tankim slojem kalaja (kositra) ili cinka. Bijeli lim se izrađuje ili potapanjem čeličnog lima ili čeličnih traka u kupku rastopljenog kalaja, ili elektrolitskim putem. Prvi način izrade bijelog lima, tzv. vruće kalajisanje, izvodi se u kupki kalaja čija je temperatura 260–280 °C. Proces kalajisanja traje oko pola sata i za to vrijeme se površina lima prevuče tankim slojem kalaja. U posljednje vrijeme grade se uređaji



Sl. 87. Kontinuirana pruga za hladno valjanje limenih traka. 1 Razmotač, 2 valjački stanovi, 3 namotač, 4 držaci petlji, 5 mikrometar

-pruge se praktično više ne grade zbog malog kapaciteta. Najviše se upotrebljavaju reverzirne kvarto-pruge sa jednim stanom i nereverzirne (jednosmjerne) kontinuirane pruge sa tri ili pet kvarto-stanova. Na duo-prugama limovi se valjuju u tablama, a na reverzirnim kvarto-prugama i kontinuiranim prugama u trakama koje se nakon valjanja razrežu na table lima.

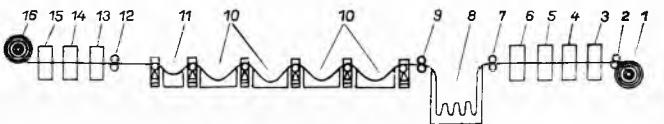
Na slici 87 prikazana je kontinuirana pruga sa tri kvarto-stana. Takve se pruge grade i sa četiri ili pet kvarto-stanova kojima dužina valjaka može biti i do 3000 mm, brzina valjanja do 35 m/seks pa i više, a težina koturova trake do 30 t.

Tehnološki proces sastoji se od ovih osnovnih operacija: uženja (dekapiranja), hladnog valjanja, žarenja (termičke obrade), eventualno ponovnog valjanja i adjustiranja (obrezivanja, rezanja, premaščivanja, pakovanja itd.).

Prije valjanja sa limova se odstranjuje oksidni sloj nastao pri vrućem valjanju i termičkoj obradi, i to se radi ili mehanički ili, što je češće, luženjem u rastvoru sumporne, solne ili azotne kiseline. Koncentracija rastvora je 10–15%, a temperatura 70–80 °C. Poslije luženja lim se pere i suši. Table lima luže se u kadama, a za luženje traka služe agregati sastavljeni od čitavog niza uređaja na kojima se operacija luženja odvija kontinuirano (slika 88).

za kontinuirano kalajisanje traka u koturovima, pri čemu je brzina kalajisanja do 2 m/seks. Prije kalajisanja, table lima, odnosno trake, moraju biti dekapirane (lužene) i moraju imati čistu površinu.

U posljednje vrijeme znatno se više upotrebljava elektrolitsko kalajisanje, jer se troši ~ 50% manje kalaja nego pri vrućem kalajisanju i ravnomjernej se raspoređuje tanki sloj kalaja po površini lima. Elektrolitsko kalajisanje izvodi se kontinuirano na posebnim agregatima koji obavljaju čitav niz operacija: obrezivanje i zavarivanje krajeva traka, površinsko čišćenje, luženje, transport trake kroz kupke sa elektrolitom, pranje, sušenje, namotavanje u koturove i rezanje trake na određenu dužinu. Elektrolit se sastoji od rastvora kalaja, sumporne kiseline i specijalnih dodataka koji povećavaju stabilnost rastvora i omogućavaju stvaranje tankog ravnomerno raspoređenog kalajnog sloja po površini čelične



Sl. 88. Agregat za kontinuirano luženje čelične trake. 1 Razmotač, 2, 7, 9 i 12, tjeralice, 3 ravnalice, 4 nož, 5 stroj za elektročno zavarivanje, 6 stroj za spajanje, 8 jama za petlju, 10 kupke za luženje, 11 kada za pranje, 13 sušilica, 14 i 15 makaze, 16 namotač

trake. Anode se izrađuju od visokokvalitetnog kalaja, a smještene su na obje strane trake. [V. i *Kalaj (kositar)*.]

Budući da je kalaj skup, za površinsko prekrivanje čeličnog lima odnosno traka češće se upotrebljava cink, tj. mjesto bijelog (kalajisanog) lima izrađuje se pocinkovan lim. Za pocinkovanje primjenjuju se također dva načina: vrući i elektrolitski (v. *Cink*).

Kao zaštitno sredstvo protiv korozije upotrebljava se i lak, te se čelični limovi i trake takođe lakiraju.

Proizvodnja cijevi

Razlikuju se dva osnovna tipa čeličnih cijevi: šavne i bešavne. Šavne cijevi izrađuju se iz valjanih čeličnih traka, a bešavne iz ingota ili iz valjanog polufabrikata.

Šavne cijevi se izrađuju tako da se čelična traka oblikuje u cijev, a dodirni rubovi se zavare bilo pod pritiskom na visokoj temperaturi bilo električnim putem. Bešavne cijevi se izrađuju iz ingota ili iz valjanog polufabrikata presovanjem u vrućem stanju, ili valjanjem i vučenjem u vrućem i hladnom stanju, i to obično tako da se do nekog određenog promjera cijevi izvaljuju u vrućem a zatim do manjeg promjera valjaju u hladnom stanju, ili se izvlače u vrućem i hladnom stanju.

Zavisno od namjene, čelične cijevi moraju zadovoljavati zahtjeve propisane standardima i tehničkim uslovima. Za sve cijevi su karakteristične dimenzije: unutrašnji i vanjski promjer, debljina zidova i dužina, a također kvalitetna svojstva: materijal, način izrade, mehanička svojstva itd. Poprečni presjek cijevi je većinom krug, ali može biti i nekog drugog oblika: kvadratnog, pravokutnog, fazonskog i dr.

Proizvodnja šavnih cijevi. Šavne cijevi izrađuju se bilo tupim zavarivanjem bilo zavarivanjem na preklop. Prvi način primjenjuje se za cijevi promjera 3,2 do 102 mm, a drugi za cijevi većeg promjera. Cijevi se izrađuju od čeličnih traka čija debljina odgovara debljinama zida cijevi. Postoji više načina izrade cijevi, ali s obzirom na način zavarivanja razlikuju se dva osnovna postupka: pećno zavarivanje i električno zavarivanje.

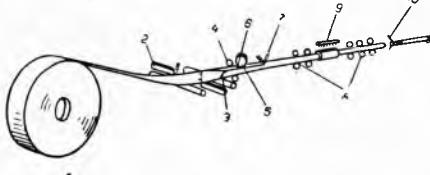
Pri *pećnom zavarivanju* traka se prethodno zagrije do temperature zavarivanja ($1300\text{--}1350^{\circ}\text{C}$), a zatim se ispušta iz peći i provlači kroz specijalni otvor na uredaju (slika 89). Pri tom se traka postepeno savije po dužini primajući kružni oblik, a rubovi sa strane pritiskuju jedan na drugi i uslijed toga se zavaruju.

Umjesto otvora sa lijevkom danas se više upotrebljavaju valci sa okruglim kalibrom u kojem se zavaruje cijev. Poslije zavarivanja cijevi se propuštaju kroz stan koji ima valjke sa okruglim kalibrima, i to obično na jednim valjcima po jedan kalibr. Kalibr na valjcima ima nešto manji promjer tako da se propuštanjem kroz njega cijev nešto izduži i dobije manji, ali po cijeloj dužini jednak vanjski promjer.

Ukoliko je potrebno znatnije smanjiti promjer cijevi, ona se propušta kroz reducirnu prugu. Reducirna pruga sastoji se od više valjačkih stanova kojima valci imaju okrugle kalibre sa postepeno sve manjim promjerom. Pri propuštanju kroz prugu cijev se i zateže, pa se ona izduži na račun smanjenja promjera. Poslije toga cijevi se ravnaju, režu na određenu duljinu, na njih se nanese zaštitni premaz i narežu navoje, a zatim se pakaju i otpremaju.

Električno zavarivanje, kojim se izrađuju cijevi različitih dimenzija, može se izvoditi na različite načine. Redoslijed tehnolo-

Sl. 90. Shema pruge za izradu elektrovarenih šavnih cijevi. 1 Traka u kotoru, 2 obrezivanje krajeva, 3 oblikovanje trake u cijev, 4 stiskanje krajeva, 5 bakreni diskovni-elektroda, 6 zavarivanje spojenih krajeva, 7 čišćenje šava, 8 kalibriranje cijevi, 9 hlađenje, 10 rezanje cijevi u hodu

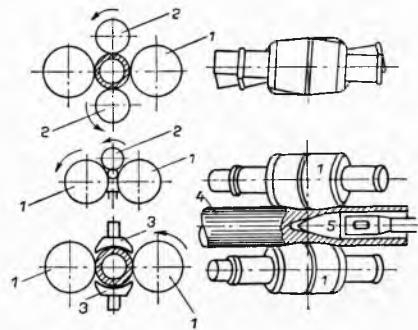


loških operacija je ovaj: traka se uzdužno obreže, zatim oblikuje (savije) i zavari, zavarena cijev se kalibriše, razrezuje i adjustira. Čitav proces u savremenoj valjaonici šavnih cijevi odvija se kontinuirano (slika 90).

Proizvodnja bešavnih cijevi. Bešavne cijevi proizvode se od različitih vrsta ugljičnih i legiranih čelika. Tehnološki proces u jednoj valjaonici bešavnih cijevi sastoji se od tri operacije: izrade šupljeg tijela (čahure), izrade cijevi iz čahure i završnih operacija s adjustiranjem gotovih cijevi.

Čahure se proizvode u vrućem stanju iz ingota ili iz valjanog polufabrikata, obično na valjačkim stanovima ili na presama. Cijevi se valjuju iz čahure također u vrućem stanju na periodičnim (pilger), automatskim ili kontinuiranim prugama, a i vrućim vučenjem. Završne i adjustažne operacije izvode se u hladnom stanju, a sastoje se u ravnanju, kalibriranju, hladnom valjanju, hladnom vučenju, rezanju, signiranju i pakovanju cijevi.

Izrada čahura. Čahure se iz ingota ili polufabrikata proizvode tako da se u materijalu probije otvor bilo valjanjem bilo presovanjem. Valjanjem se čahure mogu proizvesti na tri načina: dvostrano koničnim valj-



Sl. 91. Dvostrano konični Mannesmannovi valjci za izradu čahura. 1 Radni valjci, 2 pomoći valjci, 3 vodice, 4 valjani materijal, 5 trn

cima, jednostrano koničnim valjcima i diskovim valjcima. Na dvostrano koničnim valjcima (tipa Mannesmann) čahure se proizvode tako da se materijal probija preko jednog trna između dva radna valjka promjera $450\text{--}1000$ mm kojima je radna površina izvedena konično sa obje strane prema sredini. Oba su valjka postavljena u horizontalnoj ravni (slika 91), a njihove su osi u vertikalnoj ravni naklonjene jedna prema drugoj pod uglom od $4\text{--}14^{\circ}$. Oba se valjka okreću u istom pravcu, a materijal ulazi u valjke sa strane i premešta se uzduž valjaka (ovakvo se valjanje zove *koso valjanje*). Valjani materijal se vodi s pomoću vodećih nepogonjenih valjaka i vodica. Na prugama tipa Mannesmann izrađuju se čahure unutrašnjeg promjera $50\text{--}650$ mm, a debljina zida iznosi do 15% od promjera.

Na prugama sa jednostrano koničnim valjcima čahure se izrađuju također preko trna (slika 92). U horizontalnoj ravni valjci su postavljeni pod uglom od 30° prema osi probijanja, a u vertikalnoj ravni zatvaraju sa osi probijanja ugao $6\text{--}8^{\circ}$.

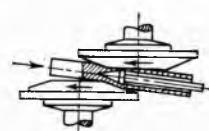
Osim radnih valjaka i ovdje postoje dva pomoćna valjka ili dvije vodice. Za vrijeme probijanja komad se postepeno pomiče u pravcu simetrale ugla između valjaka.

Na diskovim valjcima (slika 93) čahura se izrađuje preko trna, a valjani komad prolazi koso u odnosu na osi valjaka.

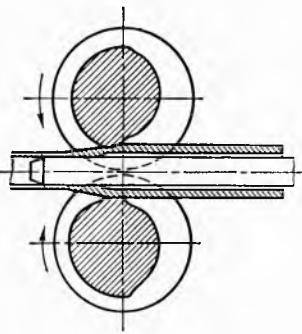
Pri svim načinima izrade čahura valjanjem materijal se postepeno okreće i pomiče na trnu između valjaka, uslijed čega se materijal u unutrašnjosti rasprskava tako da se obrazuje otvor čiji promjer odgovara promjeru trna.

Čahure se mogu izradavati i na hidrauličkim presama. Postupak se sastoji u tome da se s pomoću kalupa sa šupljinom kružnog presjeka probije rupa u odlivnom ingotu ili u prethodno valjanom polufabrikatu.

Valjanje cijevi na periodičnim (pilger-) prugama. Šuplja čahura nataknute se na čelični trn i hidrauličkim putem potiskuje među valjke. Valjci su u duo-stanu, sa kalibrima promjenljivog



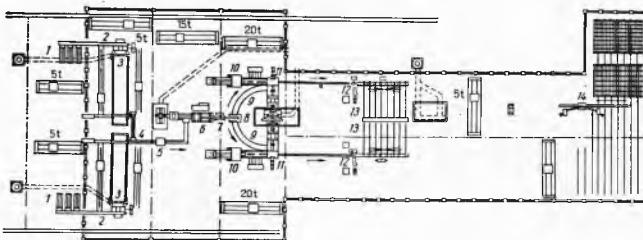
Sl. 93. Izrada čahura na valjcima-diskovima



Sl. 94. Valjanje cijevi na valjcima periodičnog djelovanja

tanje se izmakne i cijev se skine sa trna. Taj trn treba ohladiti, pa se naredna cijev valja na drugom trnu.

Na periodičnim prugama valjaju se cijevi promjera od 50 do 650 mm sa deblijinom zidova od 2,25 mm do preko 50 mm. Cijevi manjeg promjera i tanjih zidova valjaju se naknadno na reducirnim prugama ili u hladnim valjaonicama. Jedna pilger-valjaonica (slika 95) obično se sastoji od peći za zagrijavanje ingota ili valjanoj polufabrikata, jedne pruge za probijanje (izradu čahura), dvije pilger-pruge za valjanje čahura u cijevi, pila za vruće rezanje i hladnjaka. Godišnji kapacitet takvih valjaonica kreće se



Sl. 95. Raspoloženje postrojenja Mannesmannove pruge sa dvjema periodičnim prugama. 1 Rešetke, 2, 4 kotrijače, 3 peć, 5 kola za ingote, 6 Mannesmannova pruga za probijanje, 7 graničnik, 8 kola, 9 kolosijek, 10 uređaj za potiskivanje, 11 periodične (pilger-) pruge, 12 pile, 13 hladnjaci, 14 ravnalice

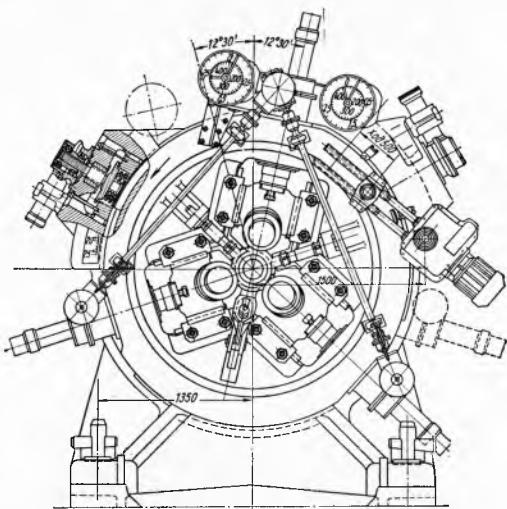
od 40 do 240 kt izvaljanih cijevi. Kao uložak služi valjani polufabrikat 80–150 mm i ingoti sa stranicama 250–700 mm.

Na automatskim prugama valjaju se cijevi promjera 57–426 mm sa deblijinom zidova 3–30 mm. Cijevi manjeg promjera valjaju se reduciranjem, a većeg raširivanjem. Cijevi se valjaju iz čahure na duo-stanovima sa valjcima koji imaju dva ili više kalibara kružnog presjeka a različitog promjera. Valja se na trnu (slika 96) koji na kraju ima čep. Pri valjanju se istovremeno smanjuje promjer cijevi i deblijina zida cijevi. Obično se izvedu 2–3 provlakane i poslije svake provlakane cijev se zakrene za 90°. Po završetku prve provlakane, kada cijev potpuno izade iz valjaka i navuče se na trn, gornji radni valjak se podiže i cijev se posebnim pomoćnim valjcima pomakne na prednju stranu pruge. Trenje potrebno da se cijev okreće između pomoćnih valjaka stvara se podizanjem donjeg pomoćnog valjka. Izvaljane cijevi su malo ovalne i nemaju dovoljno glatku površinu.

Na kontinuiranim prugama valjaju se cijevi promjera 51 do 108 mm sa deblijinom zidova 2–15 mm. Jedna pruga ima 9 valjačkih stanova pos-

kružnog presjeka (slika 94). Budući da su kalibri ekscentrični, za vrijeme rotacije valjaka mijenja se otvor (zijev) kalibra. Kako se otvor smanjuje, tako valjci stanjuju zidove cijevi, potiskujući ujedno cijev unazad. Kada se otvor (zijev) u kalibru valjaka poveća, cijev se okreće za 90° i istovremeno posebnim uredajem pomakne zajedno sa trnom naprijed među valjke, pa se zidovi cijevi dalje stišu. Nakon što je cijev izvaljana, uredaj za potiskivanje i okre-

tavljenih jedan iza drugog, a svaki se stan pogoni zasebnim motorom. Cijevi se valjaju iz čahure preko trna istovremeno na svim valjačkim stanovima.



Sl. 97. Trovaljačni stan za valjanje bešavni cijevi

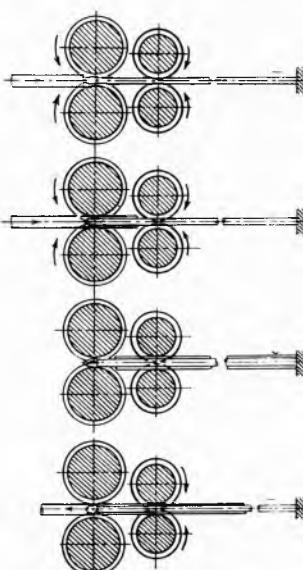
Na trovaljačnim prugama valjaju se cijevi promjera 40–200 mm sa deblijinom zidova 3–25 mm. Valjački stan ima tri valjka postavljena tako da im osi leže u vrhovima istostranog trougla (slika 97), a čahura je navučena na čelični trn. Ove se pruge obično upotrebljavaju za valjanje cijevi od legiranih čelika. Ovaj način valjanja omogućava veliku tačnost dimenzija cijevi.

Osim navedenim načinima, cijevi se mogu izradivati još protiskivanjem i presovanjem. Protiskivanje sastoji se u tome da se na presi za probijanje izradi čahura koja nije potpuno šupljia nego ima dno. Takva čahura se stavlja na jedan trn i protiskuje kroz niz otvora (prstenova) čiji se promjeri postepeno smanjuju, tako da posljednji otvor daje željeni promjer cijevi. Presovanjem se cijevi izrađuju tako da se materijal istiskuje kroz poseban otvor u matrici. Za tu svrhu služe vertikalne i horizontalne hidrauličke prese.

Cijevi neposredno poslije valjanja ne odgovaraju propisima standarda i tehničkih uslova. Zbog toga se nakon valjanja podvrgavaju različitim operacijama kao što su: ravnanje, obrezivanje i rezanje na propisane dužine, termička obrada, kalibriranje, narezivanje navoja na krajevima, premazivanje, pocinkavanje itd. Ako je potrebno izvaljanim cijevima smanjiti promjer, one se valjuju u vrućem stanju bez trna na reducirnim prugama na isti način kao i kad se smanjuje promjer šavnih cijevi.

Hladno valjanje i vučenje cijevi. Vrućim valjanjem ne mogu se dobiti cijevi manjeg promjera od ~ 50 mm. Ako postoji i reducirna pruga, mogu se dobiti cijevi promjera 17–18 mm. Osim toga, vrućim valjanjem ne dobivaju se cijevi sa potpuno čistom površinom, pravilnim geometrijskim oblikom i potpuno tačnim dimenzijama. Da bi se dobile cijevi manjeg promjera i/ili čiste površine i tačnih dimenzija, vruće valjane cijevi se nakon žarenja i luženja podvrgavaju hladnom valjanju na specijalnim prugama i vučenju na vučnim klupama. Na taj način mogu se dobiti cijevi promjera 1,0–150 mm sa deblijinom zidova 0,1–3 mm. Ponekad se hladno valjuju cijevi promjera 250–450 mm, a hladno vuku cijevi promjera do 0,3 mm.

Za hladno valjanje postoje valjaonike pruge različitih tipova. Široku upotrebu imaju pruge sa pokretnim valjačkim stanom u kojem se nalaze dva valjka sa kalibrima promjenljivog radijusa, slično kao kod pilger-valjaka. Cijevi se valjaju na koničnom trnu pri čemu se valjci sa stanom pomiču naprijed i nazad. O vučenju cijevi v. poglavje Vučenje i duboko izvlačenje u ovom članku.



Sl. 96. Valjanje na automatskoj pruzi

Proizvodnja specijalnih čeličnih profila

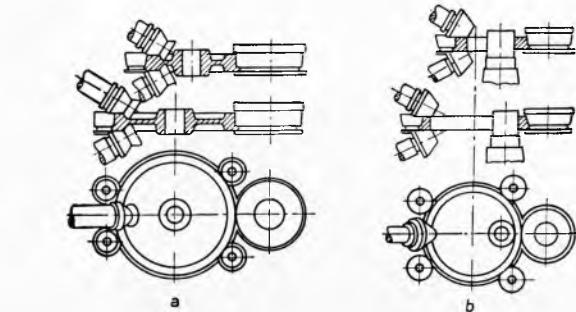
Proizvodnja točkova i bandaže. Točkovi za željezničke vagone izrađuju se ili u jednom komadu ili sastavljeni. Sastavljeni točkovi sastoje se od livenog ili valjanog diska (centra) i na njega navučene bandaže. Točkovi u jednom komadu (monoblokovi)

izraduju se livenjem ili valjanjem. Obično se točkovi, bilo monoblokov bilo sastavljeni, izrađuju kombinacijom kovanja i valjanja. Kao početni materijal služe ingoti od tvrdog ugličnog čelika višestranog poprečnog presjeka, težine 3–5 t. Ingoti se razrežuju u nekoliko dijelova (trupaca) takve težine da se iz jednog trupca dobije jedan točak, odnosno jedna bandaža.

Tehnološki proces izrade točkova u jednom komadu (monoblokova) prikazan je shematski na slici 98. Trupac se zagrije u peći na temperaturu 1150–1200 °C, na presi pritiskom 3000–10 000 MPa sabije se u tzv. pogaču čiji promjer približno odgovara promjeru točka, i u pogači se probije otvor; na istoj ili drugoj presi iz pogače se onda oblikuje disk, koji se zatim izvalja na valjačkom stanu (slika 99 a), a na presi dobiva konačan oblik; konačno se točak termički obradi.

Sl. 98. Shema izrade točkova

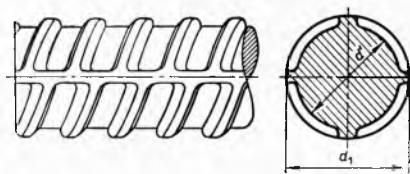
Tehnološki proces izrade bandaže je ovaj: trupac se zagrije u peći i na presi sabije u pogaču; u pogači se probije otvor koji



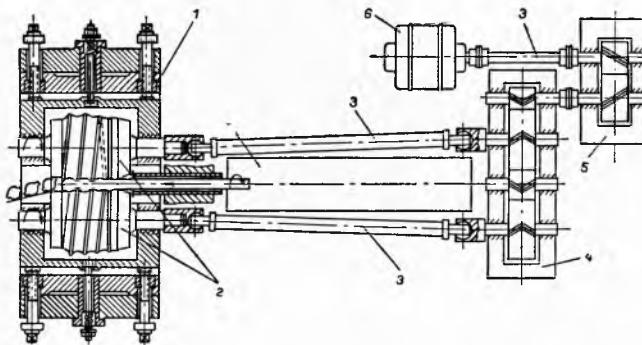
Sl. 99. Valjanje bandaže i točkova. a Izrada točka, b izrada bandaže

se zatim proširi; materijal se ponovo zagrije u peći i onda valja najprije na pripremnom, a zatim na završnom valjačkom stanu (slika 99 b); izvaljana bandaža se ravna na presi i termički obrađuje.

Valjanje periodičnih profila. Periodičnim valjanjem dobivaju se profili kojima se poprečni presjek mijenja tako da se promjena presjeka periodično ponavlja po dužini valjanog komada. Danas se različiti periodični profili proizvode uzdužnim i poprečnim valjanjem. Uzdužnim periodičnim valjanjem dobiva se npr. rebrasti betonski čelik (slika 100), koji se uvelike primjenjuje u građevinarstvu. Takvi se profili valjuju na istim prugama na

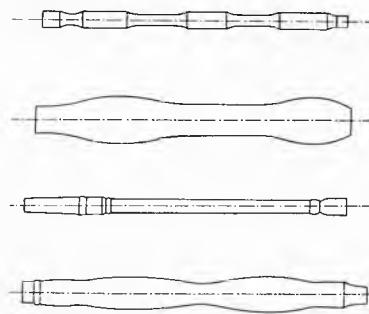


Sl. 100. Periodični profil (betonski čelik)



Sl. 101. Proizvodnja kugli poprečnim valjanjem. 1 Valjački stan, 2 valjci, 3 prenosna vretena, 4 prenosni stan, 5 reduktor, 6 elektromotor

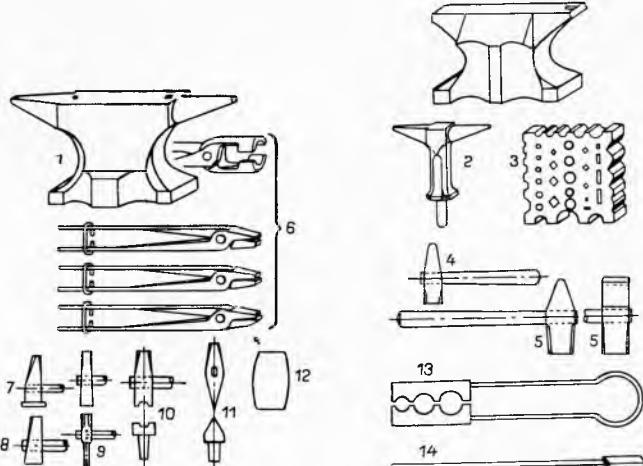
kojima se valjuju i obični profili. Za vrijeme poprečnog periodičnog valjanja valjani se komad obrće oko svoje osi. Poprečnim periodičnim valjanjem mogu se proizvoditi kugle (slika 101) i različiti drugi profili promjenljivog poprečnog presjeka (slika 102).



Sl. 102. Različiti valjani periodični profili

Kovanje

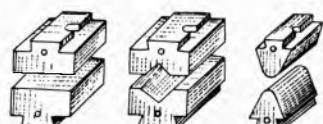
Razlikuje se slobodno i ukovno (kalupno, utopno, matricirano) kovanje. Pri slobodnom kovanju materijal se slobodno širi i izdužuje u svim horizontalnim pravcima. Kovani proizvod — otkivak — nema tačne dimenzije ni dovoljno čiste ni ravne površine, pa ga nakon kovanja treba mehanički obraditi. Ukovno kovanje predstavlja kovanje u posebnom alatu — ukovnju (kalupu, utopu, matrici) koji svojim stranicama ograničava širenje materijala. Na taj način dobiven otkivak ima pravilan oblik, tačne dimenzije i čistu površinu pa ga ne treba mehanički obradivati, ili se mehanički obraduju samo pojedini njegovi dijelovi. Slobodno kovanje se primjenjuje u pojedinačnoj, a ukovno kovanje u masovnoj i



Sl. 103. Alati za ručno kovanje. 1 Nakovani, 2 uložak za kovanje malih komada, 3 ploča s otvorima, 4 ručni čekić, 5 malj, 6 klješta, 7 ravnica, 8 podmetač, 9 probijač, 10 kalupni čekić, 11 sjekac, 12 izbočeni cilindrični probijač, 13 elastični kalup, 14 raskivaca

serijskoj proizvodnji. U poređenju sa slobodnim kovanjem, ukovno kovanje ima ove prednosti: visoka proizvodnost, tačna izrada, dobar kvalitet površine otkivka i mogućnost da se dobije otkivak složenog oblika. Nedostaci su mu što se mogu izradivati samo otkivci male težine (mase do 200 kg, a samo u iznimnim slučajevima veće) i što je ukovanj skup a može se upotrebljavati samo za jedan određeni otkivak. Slobodno kovanje dijeli se na ručno (za male otkivke u priručnim i zanatskim kovačnicama) i mašinsko (za veće otkivke u industrijskim kovačnicama).

Postrojenja za kovanje. Za kovanje služe posebni alati, i to za slobodno ručno kovanje ručni alati (slika 103), za slobodno mašinsko kovanje mašinski alati (slika 104), a za ukovno kovanje alati koji se različito nazivaju: ukovnji, kalupi, utopi ili matrice.



Sl. 104. Osnovni alati (udarne površine) strojnog kovanja

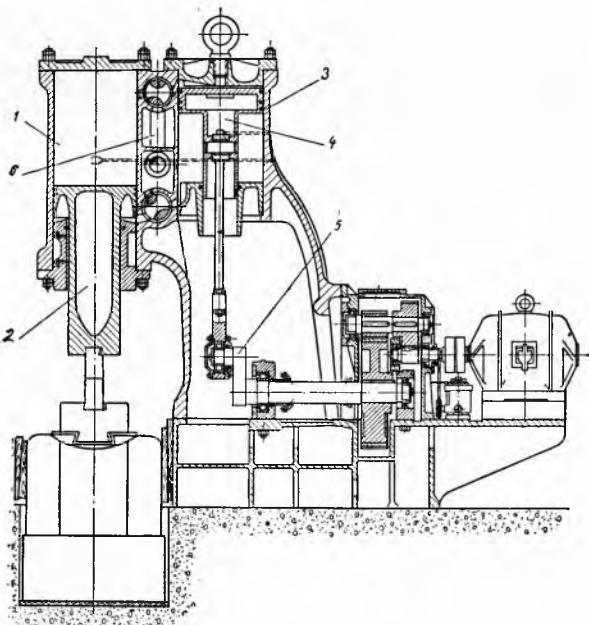
Za slobodno mašinsko i za ukovno kovanje upotrebljavaju se čekići i prese. Osnovna karakteristika čekića je masa padajućih dijelova (malja sa polugom i klipom), koja iznosi od 25 kg do 125 t. Mehanički čekići deformiraju materijal udarom dijelova koji padaju brzinom od 3...6 m/sek. Prema pogonu razlikuju se:

parno-vazdušni čekići pogonjeni parom ili komprimiranim vazduhom pritiska 7...9 at; vazdušni čekići pogonjeni vazduhom komprimiranim u jednom cilindru na samom čekiću i mehanički čekići pogonjeni elektromotorom preko prenosnog mehanizma (frikcioni čekići sa daskom, sa remenom, sa užetom, krivajni čekići sa polugama i sa oprugama).

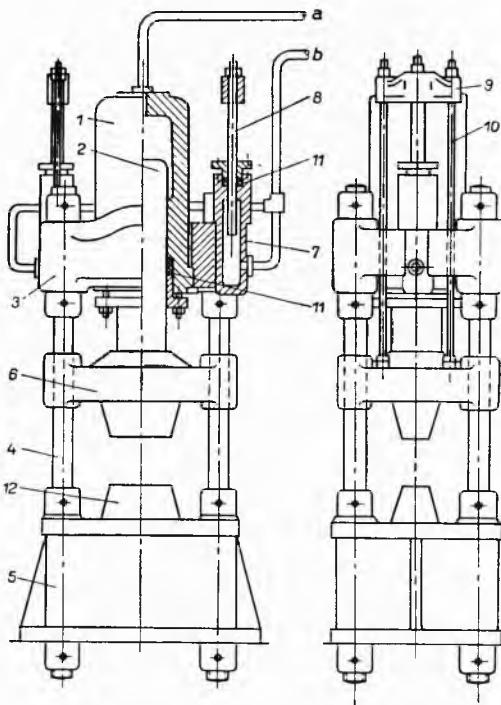
Parno-vazdušni čekići imaju padajuće dijelove mase najčešće 0,5...6 t, a upotrebljavaju se mnogo za kovanje fazonskih otkivaka mase 8...200 kg i prostih otkivaka mase 100...1500 kg. Izraduju se kao čekići prostog djelovanja, kojima para ili vazduh služi samo za dizanje padajućih dijelova, i čekići dvostrukog djelovanja (slika 105), kojima se padajući dijelovi kreću prema dolje ne samo uslijed vlastite težine nego i uslijed djelovanja pritiska pare ili vazduha.

Sl. 105. Parno-vazdušni čekići. 1 Stalci, 2 postolje, 3 vijci, 4 opruge, 5 vodice, 6 malj (bat), 7 pedal

Vazdušni (pneumatski) čekići (slika 106) upotrebljavaju se za kovanje lakošćih otkivaka, i to fazonskih do 20 kg i prostih do 250 kg, a masa padajućih dijelova obično je 50 do 1000 kg.



Sl. 106. Vazdušni čekići. 1 Radni cilindar, 2 malj (bat), 3 kompresorni cilindar, 4 klip, 5 krivajni mehanizam, 6 razvodnik



Sl. 107. Hidraulična presa. a Dovod vode visokog pritiska, b dovod vode niskog pritiska. 1 Radni cilindar, 2 klip, 3 nepokretna poprečna greda, 4 stubovi, 5 postolje, 6 pokretna poprečna greda, 7 povrtni cilindar, 8 povrtni klipovi, 9 male grede, 10 brtvište, 11 brtvište, 12 svornjaci

Kovačke prese se dijele na hidrauličke i mehaničke. Kuje se pritiskom pokretnih dijelova koji se na hidrauličkim presama pogone pomoću vode (slika 107), a na parno-hidrauličkim pomoću vode i pare. Na mehaničkim presama pokretni dijelovi se pogone elektromotorom preko krivajnog, polužnog i zupčanog mehanizma. Za lakše otkivke upotrebljavaju se mehaničke, a za teže i najteže otkivke hidrauličke prese. Sila radnog pritiska hidrauličke prese iznosi od 50 do 15 000 MPa i više.

Za ukovno kovanje, pored navedenih čekića i presa, upotrebljavaju se također horizontalni kovački strojevi i još neke konstrukcije kovačkih presa i strojeva.

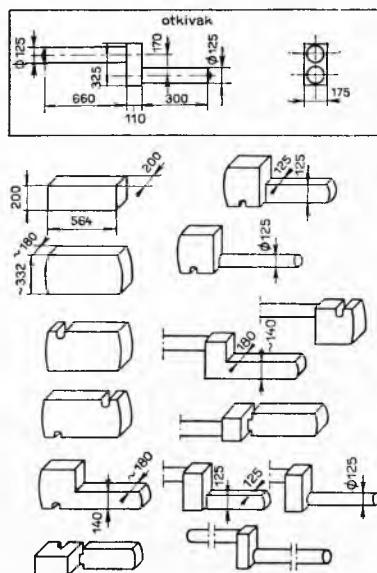
Tehnologija slobodnog kovanja. Otkivci se otkivaju iz valjanog polufabrikata bilo tako da se za jedan otkivak upotrebljava jedan ingot ili polufabrikat određene dužine, bilo tako da se polufabrikat razreže na više komada, zavisno od težine pojedinog otkivka. Ingoti ili valjani polufabrikati se prije kovanja zagrijavaju u zagrijevnim pećima na potrebnu temperaturu, a zatim se kuju. Poslije kovanja otkivci se termički obraduju, a zatim im se površina čisti. Katkada se materijal prije zagrijavanja podvrgava površinskom čišćenju na isti način kao i prije valjanja. Otkivci se mogu otpremati poručiocima bez mehaničke obrade, ili se prethodno mehanički obrade.

Prije nego što se pristupi kovanju izrađuje se crtež otkivka prema gotovom obrađenom komadu, uzimajući u obzir kovačke tolerancije i dodatak za mehaničku obradu. Veličina dodatka za mehaničku obradu zavisi prije svega od veličine otkivka: za veće otkivke predviđa se veći dodatak za mehaničku obradu. Kovačke su tolerancije dozvoljena odstupanja dimenzije otkivka od njegovih nominalnih dimenzija.

Proces kovanja sastoji se od niza tehnoloških operacija od kojih su osnovne: sabijanje, izdužavanje, probijanje, prosijecanje, odsijecanje, savijanje, uvijanje i zavarivanje.

Sabijanjem se smanjuje visina kovanog komada i poboljšavaju njegova mehanička svojstva. **Izdužavanje** predstavlja kovačku operaciju kojom se povećava dužina kovanog komada na račun njegovog poprečnog presjeka. Prilikom izdužavanja kovani komad se ili okreće za 90° poslije svakog udarca, ili se udarci nanose po jednoj strani pri čemu se poslije svakog udarca kovani komad pomiče tako da se udarci djelomično prekrivaju, a tek kad se prešla dužina čitave strane komad se okreće za 90°. **Prosijecanje**

i *probijanje* kovačke su operacije kojim se u kovanom komadu izrađuju otvori (rupe) ili udubljenja. *Odsijecanje, savijanje i izvijanje* su tehnološke operacije koje su često uključene u proces kovanja. *Kovačko zavarivanje* je operacija kojom se dva zagrijana komada čelika ili više njih jedan sa drugim spajaju kovanjem; primjenjuje se pri kovanju manjih otkivaka. Otkivci se izrađuju postepenim kovanjem ingota ili valjanog polufabrikata kako se vidi na slici 108, gdje je prikazano, kao primjer, kako se izrađuje na čekiću jedna koljenasta osnova iz valjanog bluma dimenzija $200 \times 2000 \times 564$ mm.



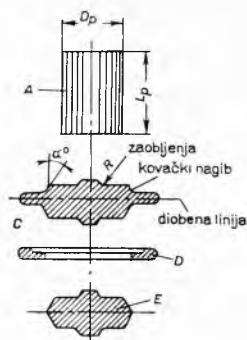
Sl. 108. Postupak izrade jednog otkivka. Gore radionički nacrt, dolje faze izrade (redoslijed odozgo dolje, slijeva nadesno)

Ukovo kovanje na čekićima. Kovani komad se oblikuje u šupljinama ukovnja, u tzv. gravurama. Svaki ukovanj sastavljen je od najmanje dva dijela, gornjeg i donjeg ukovnja, a svaki od njih može da se sastoji od jednog ili od više dijelova.

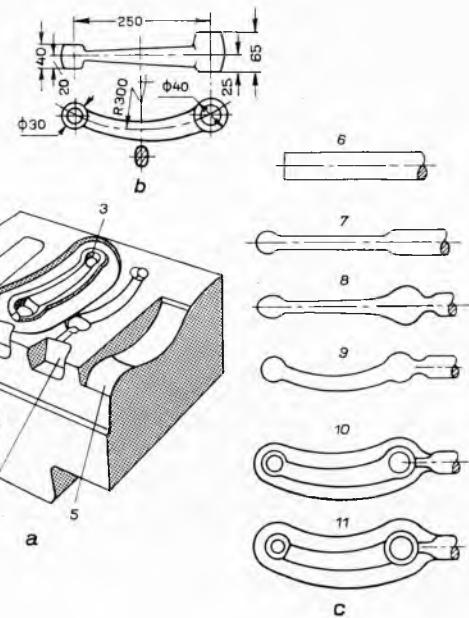
Kovani komad stavlja se u gravuru kada je gornji ukovanj razmaknut od donjeg (slika 109). Zatim se udarcem čekića, odnosno pritiskom prese, primiče gornji ukovanj donjem tako da kovani komad ispunjava gravuru primajući postepeno njen oblik. Kada je kovani komad ispunio gravuru, ukovni se razmiču i otkivak se vadi.

Ukovo kovanje izvodi se češće u toplo, a rijede u hladnom stanju. Kao sirovina služi šipkasti materijal većinom kružnog ili kvadratnog presjeka, a za složenje otkivke upotrebljavaju se polufabrikati fazonskog presjeka dobiveni valjanjem, a u nekim slučajevima i livenjem.

Otkivak jednostavnog oblika izrađuje se u jednoj, tzv. završnoj gravuri, ali se za većinu otkivaka upotrebljava, osim završne, još jedna ili više različitih pripremnih gravura (slika 110), koje mogu biti otvorene ili zatvorene. U otvorenim gravurama (slika 111 a) materijal se može slobodno širiti u horizontalnim pravcima, a u zatvorenim (slika 111 b) bočne stranice gravure ograničavaju širenje materijala u horizontalnim pravcima. Završne



Sl. 109. Kovanje u ukovnju na čekiću sa završnom gravurom. 1 Donji ukovanji, 2 gornji ukovanji, 3 malji čekići, 4 držać ukovnja, 5, 7, 9 klinovi, 6, 8 pričvršćni komadi, 10 sto čekića, A početni komad (trupac), B kovani komad, C otkivak sa vijencem, D odrezani vijenac, E otkivak

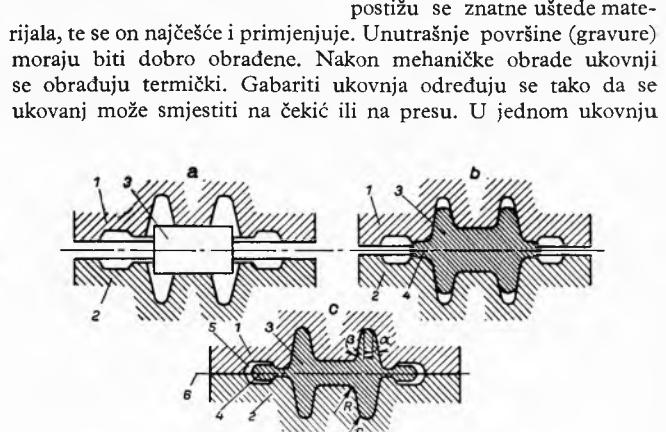


Sl. 110. Kovanje u ukovnju sa više gravura. a Donji ukovanj: 1, 2, 5 pripremne gravure, 3 završna gravura, 4 predzavršna gravura; b otkivani i obrezani otkivak; c faze kovanja: 6 početni komad, 7, 8 poslije kovanja u pripremnim gravurama, 9 poslije kovanja u predzavršnoj gravuri, 10, 11 poslije kovanja u završnoj gravuri

gravure također mogu biti otvorene i zatvorene. U otvorenim gravurama (slika 111 c) na mjestu sastava gornjeg i donjeg ukovnja nalazi se kanal u kojem se skuplja višak materijala, što omogućava da se gravura bolje popuni materijalom. Na taj se način na mjestu sastava gornjeg i donjeg ukovnja stvara oko cijelog otkivka vijenac (v. sliku 109) koji se nakon kovanja odreže posebnim alatom.

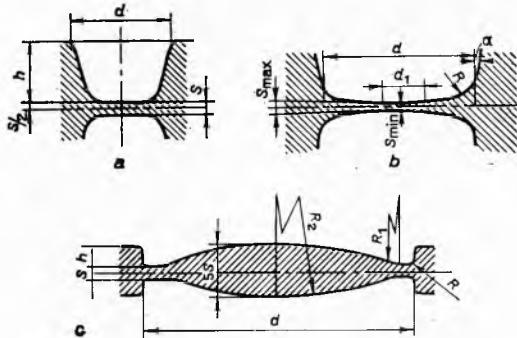
Pri kovanju u zatvorenoj završnoj gravuri ne nastaje vijenac oko otkivka (slika 111 d). Ovakvim načinom kovanja ne dobiva se tačna visina otkivaka a stranice ukovnja brže se troše. U ukovnjima se kuje sa nekoliko udaraca, pri čemu kovani komad postepeno prima željeni oblik (slika 112).

Ukovni se mogu izraditi od legiranog čelika livenjem ili kovanjem. Prvim načinom postižu se zнатне uštede materijala, te se on najčešće i primjenjuje. Unutrašnje površine (gravure) moraju biti dobro obradene. Nakon mehaničke obrade ukovnji se obraduju termički. Gabariti ukovnja određuju se tako da se ukovanj može smjestiti na čekić ili na presu. U jednom ukovnju



Sl. 111. Gravure. a Otvorena pripremna, b zatvorena pripremna, c otvorena završna, d zatvorena završna

može da se nalazi jedna ili više završnih gravura, ili jedna završna i jedna ili više pripremnih gravura, što zavisi od oblike i dimenzije otkivaka. Za konstruisanje gravura upotrebljavaju se iskustvene formule. Završna gravura daje konačan oblik kova-



Sl. 113. Ostavljanje dna na otkivku s otvorom. a) Rayno dno, b) na krajevima zadebljano dno, c) u sredini zadebljano dno

nom komadu, a njen oblik i dimenzija određuje se prema obliku i dimenzijama otkivka u vrucuštu stanju (uzimajući u obzir skupljanje materijala, $\sim 1,5\%$). Crtež otkivka, a time i crtež završne gravure, izrađuje se prema crtežu radioničkog komada. Pri izradi crteža utvrđuju se: položaj otvora ukovnja, dodatak za obradu, tolerancije, nagib bočnih stranica, radijusi zaobljenja i radni uslovi kovanja. Na crtežu otkivka naznači se diobena linija koja odgovara položaju otvora završne gravure, tj. mesta gdje se sastaje gornji i donji ukovanji (otvor ukovnja). Položaj otvora mora biti takav da se otkivak može lako izvaditi iz gravure ukovnja, pa se po pravilu otvor postavlja u ravni dviju najvećih među sobom okomitih dimenzija otkivka. Dodatak za mehaničku obradu predstavlja sloj materijala za koji je potrebno povećati dimenzije otkivka radi njegove mehaničke obrade, a obično se predviđa samo na onim površinama koje se spajaju sa drugim detaljima; druge površine otkivka obično ostaju neobrađene. Veličine dodataka za obradu standardizovane su u zavisnosti od dimenzija otkivka. Kovačke tolerancije su dozvoljena odstupanja od nominalnih dimenzija otkivka i one su također odredene standardima.

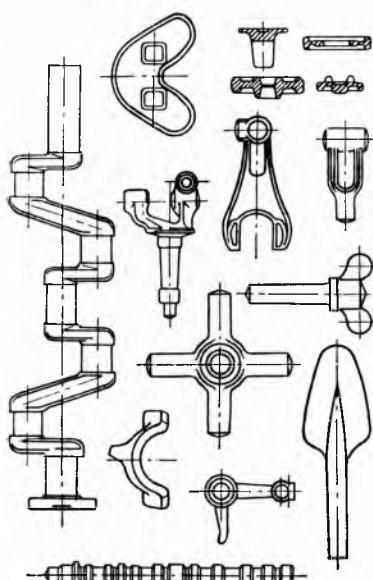
Da bi se otkivak lakše izvadio iz ukovnja, bočne stranice završne i predzavršne gravure imaju nagib od $3\text{--}15^\circ$ prema vertikali na obe strane od otvora ukovnja. Radi boljeg popunjavanja materijalom, sva su prelazna mesta gravure zaobljena sa radijusom čija veličina zavisi od dubine gravure na tom mjestu.

U otkivcima koji nakon konačne mehaničke obrade treba da imaju otvore (rupe), prilikom samog kovanja u ukovnju ne mogu se izraditi potpuni otvori, nego se ostavlja dno koje se pri završnoj operaciji prosijeca (probija), a čiji oblik i debljina zavise od dubine i promjera rupe (slika 113). U normalnom slučaju (slika 113 a), debljina dna može se odrediti po formuli:

$$S = 0,45 \sqrt{d} - 0,25 h - 5 + 0,6 \sqrt{h}$$

gdje je \$S\$ debljina dna, \$d\$ promjer otvora, \$h\$ dubina otvora, sve u milimetrima.

Pri konstruisanju otkivka potrebno je brižljivo ispitati: da li se izmjenom oblika komada može pojednostaviti konstrukcija otkivka i smanjiti broj ili težina tehničkih operacija; da li se mogu otkivci za različite detalje unificirati; da li je pogodnije razdijeliti detalje na dva ili više otkivaka koji bi se kasnije zavarivanjem ili drugim načinom spajali; da li se mogu izraditi dva ili više komada u jednom otkivku koji bi se kasnije razrezivao; da li se mogu dva detalja spojiti u jedan otkivak da bi se izbjeglo



Sl. 114. Primjeri otkivaka izrađenih ukovnim kovanjem na čekiću

njihovo naknadno spajanje; da li je povoljno primijeniti kombinovano slobodno i ukovno kovanje itd. Nekoliko otkivaka otkovanih na čekićima prikazano je na slici 114.

Dimenzije početnog (sirovog) komada koji se podvrgava ukovnom kovanju određuju se prema načinu kovanja. Otkivci koji u horizontalnoj projekciji imaju kružni ili kvadratni oblik kuju se sabijanjem komada po visini, te se promjer \$d\$, odnosno stranica \$a\$, mogu odrediti po formulama

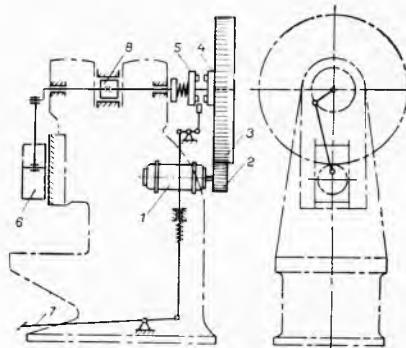
$$d = 1,08 \sqrt[3]{\frac{V_p}{m}}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{V_p}{m}},$$

gdje je \$m\$ odnos dužine prema promjeru (stranici) početnog komada (kreće se u granicama od 1,5 do 2,8), \$V_p\$ volumen početnog komada (sastoji se od volumena otkivka, ev. volumena rubnog vijenca i gubitka zbog stvaranja odgorka pri zagrijavanju). Za izradu ostalih otkivaka presjek je početnog komada

$$A_p = \frac{(1,05 \cdots 1,3) V_p}{l_0},$$

gdje je \$l_0\$ duljina otkivka.

Ukovno kovanje na ostalim kovačkim strojevima. *Ukovno kovanje na krivajnim presama.* Krivajne prese spadaju u grupu mehaničkih presa kod kojih kretanje radnog pritiskivanja ostvaruje mehanizam krivave, sam ili u sastavu sa još nekim kinematičkim elementima (slika 115). Glavno vratilo prese na kojoj se

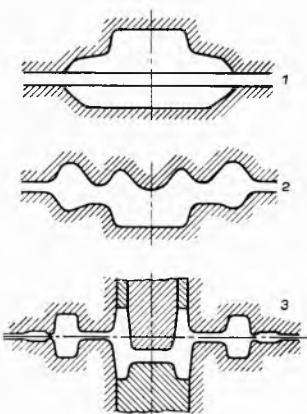


Sl. 115. Shema krivajne prese

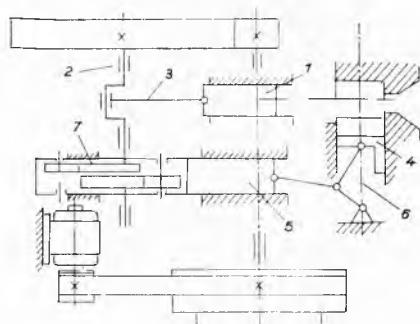
nalazi ozubljeni zamajac 3 pogoni se motorom 1 preko zupčanika 2. Zamajac 3 je slobodno postavljen na vratilo prese i za njega je vezan jedan dio spojnica 4. Drugi dio spojnica 5 čvrsto je vezan za vratilo. Spajanjem dijelova spojnica pritiskom na pedalu 7 pogoni se mehanizam krivave, a time se pokreće i pritiskivač 6. Otpuštanjem pedale dijelovi spojnica se rastavljaju i rad prese se zaustavlja, a da se ne zaustavlja motor. Krivajni mehanizam može biti izveden u vidu ekscentra ili koljena, te se prema tome razlikuju ekscentarske prese i koljenaste prese.

Na ovim presama može se kovati u otvorenim i u zatvorenim ukovnjima, također izvoditi različite druge kovačke operacije. Razlika je prema kovanju na čekićima u tome što se pri kovanju na krivajnim presama gornji i donji ukovanji ne dodiruju (sl. 116).

Ukovno kovanje na horizontalnim kovačkim strojevima. Jedan horizontalni kovački stroj prikazan je na sl. 117 desno, a njegova kinematička shema na sl. 117 lijevo. Glavni potiskivač 1, na kojem se nalazi potiskivač, pogoni se elektromotorom preko krivajnog vratila 2 i poluge 3. Držać pokretne matrice 4 pokreće se bočnim potiskivačem 5 preko sistema poluga 6, a bočni potiskivač pogoni



Sl. 116. Gravure ukovanja za kovanje na krivajnoj presi. 1, 2 Pripremne grave, 3 završna gravura

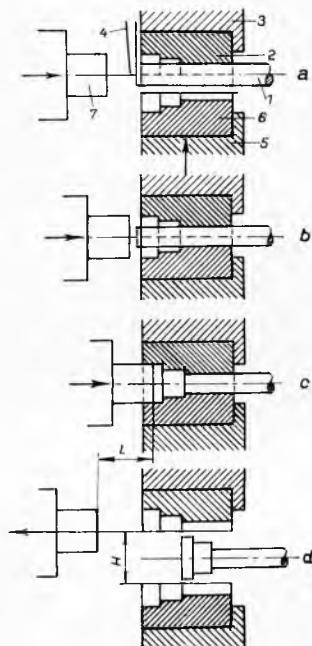


Sl. 117. Horizontalni kovački stroj. Desno vanjski izgled, gore kinematička shema (objašnjenje u tekstu)

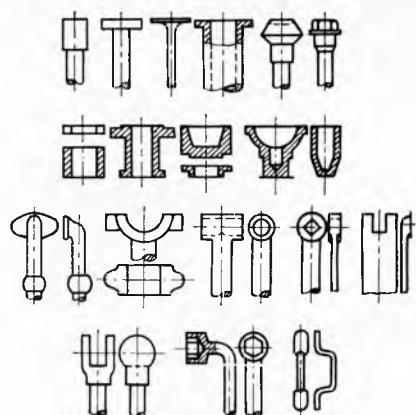
se prenosom 7 od krivajnog vratila. Ukovni za ove strojeve sastoje se od nepokretnih i pokretnih matrica sa jedne i pritiskivača sa druge strane. Shema procesa kovanja prikazana je na slici 118, a nekoliko otkivaka na slici 119.

Ukovno kovanje na hidrauličkim presama. Hidrauličke prese za ukovno kovanje po principu djelovanja ne razlikuju se od hidrauličkih presa za slobodno kovanje. Na njima se obično otkivaju teški otkivci složenog oblika kao što su koljenaste osovine i slično.

Za ukovno kovanje služe i frizione prese, horizontalne prese za savijanje i drugi kovački strojevi.

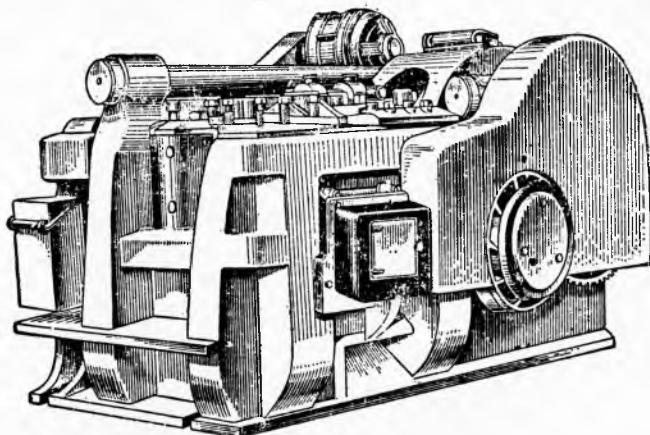


Sl. 118. Faze kovanja na horizontalnom kovačkom stroju. 1 Trupac, 2 nepokretna polovina matrice, 3 zid stroja, 4 graničnik, 5 pokretni držač, 6 pokretna polovina matrice, 7 pritiskivač. a Trupac umetnut u otvorenu matricu, b matrica zatvorena, c otkivanje, d otkivak izlazi iz otvorene matrice. H otvor matrice, L hod pritiskivača

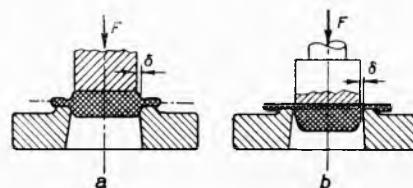


Sl. 119. Primjeri otkivaka kovanih na kovačkom stroju

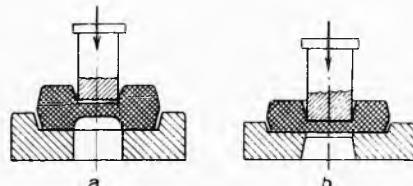
Završne tehnološke operacije ukovnog kovanja jesu: obrezivanje, probijanje, prosjecanje, čišćenje i ravnanje. Obrezivanjem u ukovnju za obrezivanje (slika 120) odstranjuje se rubni vijenac sa otkivka. Prosijecanje (probijanje) otvora u otkivcima izvodi se sličnim alatom (slika 121), samo što je režući elemenat ovdje probijač. Nakon obrezivanja ili probijanja otkivcima se



površina očisti od kovarine, i to obično pjeskarenjem u bubnjevima, a zatim se oni ravnaju na čekićima i presama između ravnih udarnih površina.



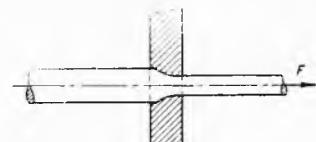
Sl. 120. Obrezivanje otkivka



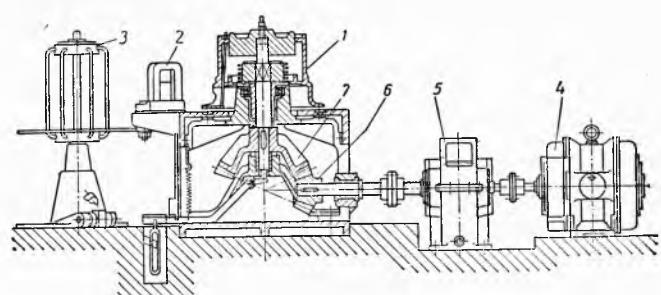
Sl. 121. Probijanje i prosijecanje otvora u otkivcima
a Probijanje (jednom oštricom), b prosijecanje (dvjema oštricama)

Vučenje i duboko izvlačenje

Vučenje je postupak plastične prerade pri kojem se materijal u hladnom stanju provlači kroz otvor (matricu) čiji je presjek manji od presjeka materijala prije vučenja (slika 122). Pri tome se materijalu povećava dužina na račun presjeka, a istovremeno mu se poboljšaju kvalitet površine i mehaničke osobine. Za vučenje služe specijalni strojevi na kojima je alat sa otvorom, tzv. *vučni kamen*, izrađen od tvrdog materijala. Tako se npr. vučenjem može dobiti vučena žica promjera 0,1 mm, dok se valjanjem ne može dobiti žica promjera manjeg od 5 mm. Vučenjem se najviše proizvode žice, šipke i cijevi, a mogu se pro-

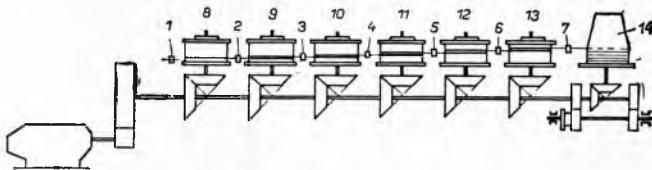


Sl. 122. Shema vučenja



Sl. 123. Stroj za jednostruko vučenje. 1 Bubanj, 2 matrica, 3 vitlo, 4 elektromotor, 5 reduktor, 6, 7 zupčasti prenos

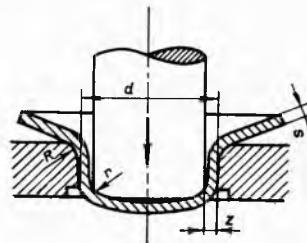
izvesti i drugi profili različitog oblika. Profili (žica, šipke i cijevi) manjeg presjeka, koji se lako savijaju, izvlače se na posebnim vučnim strojevima i namotavaju u koturove, a profili većeg presjeka izvlače se u šipkama. Vučenje je jednostruko ako stroj ima samo jednu matricu (slika 123) a višestruko ako na stroju materijal prolazi uzastopno kroz nekoliko matrica (otvora), pri čemu se presjek materijala postepeno smanjuje (slika 124). Zavisno od



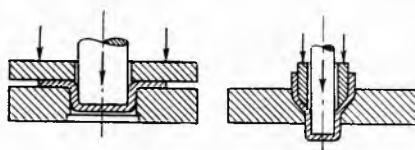
Sl. 124. Stroj za višestruko vučenje. 1...7 Matrice, 8...14 bubnjevi

veličine redukcije presjeka vučenje se može obavljati jedanput ili više puta. U ovom posljednjem slučaju materijal se žari između pojedinih vučenja, da mu se snizi otpornost deformaciji i povisi plastičnost. Pri vučenju žice mnogo se primjenjuje postupak termičke obrade zvan *patentiranje*, koji se sastoјi u tome da se materijal zagrije iznad Ac_3 i zatim hlađi u rastopljenom olovu (v. poglavlje Termička obrada). Time se postiže velika čvrstoća i velika plastičnost materijala. Za ovakav postupak vučenja služe višežični kontinuirani agregati koji istovremeno izvode i druge tehnološke operacije. Konačna termička obrada vučenih proizvoda sastoјi se od svjetlog žarenja, kaljenja, kaljenja sa otpuštanjem i dr. Vučene žice i šipke također se ravnaju, bruse, poliraju i režu, a često se i površinski zaštićuju pocinkavanjem, hromiranjem, emajliranjem, lakiranjem itd.

Duboko izvlačenje je proces kojim se čelični lim protiskupe kroz otvor prstenastog ili sličnog oblika u matrici i tako izrađuju različiti predmeti. Po pravilu, tanki čelični limovi se duboko izvlače u hladnom stanju, a samo pri izradi nekih većih predmeta upotrebljavaju se debeli limovi u zagrijanom stanju. Predmeti jednostavnijeg oblika i nevelike dubine izrađuju se izvlačenjem pomoću matrice i izvlakača (slika 125). Pri izradi složenijih i dubljih predmeta



Sl. 125. Izvlačenje bez pritiskivača



Sl. 126. Izvlačenje sa pritiskivačem

potrebno je i posebno pritiskati lim da se sprječe nabori po bočnim stranicama predmeta (slika 126). Izrađeni predmeti mogu se termički obraditi i površinski zaštiti na različite načine.

M. Čaušević

Klasifikacija valjanih i vučenih proizvoda

Valjani proizvodi dijele se prema postupku proizvodnje na *toplo valjane* i *hladno valjane* proizvode, a prema stepenu do kojeg su preradeni, na *polufabrikate* i na *gotovu robu*. Gotova se valjana roba dijeli na valjane profile, valjane plosnate proizvode i valjane cijevi.

Toplo valjani polufabrikati po pravilu su kvadratnog ili pravougaonog presjeka sa zaobljenim ivicama. Kvadratni se nazivaju *kvadratne gredice* ako im je presjek ispod 150×150 mm, ili *blumovi* ako imaju presjek 150×150 mm i više. Pravougaoni polufabrikati obuhvaćaju *platine*, širine $150 \dots 400$ mm i debljine $10 \dots 80$ mm, *slabove* širine preko 600 mm i debljine preko 80 mm i *plosnate gredice* širine $40 \dots 90$ mm i debljine $20 \dots 40$ mm. U tablici 3 prikazana je raspodjela ovih polufabrikata po nomenklaturnim grupama.

Tablica 3
TOPLO VALJANI POLUFABRIKATI

Naziv	Oblik	Teški profili, dimenzije presjeka, mm	Srednji profili, dimenzije presjeka, mm
Blumovi		$150 \times 150 \dots 400 \times 400$	
Gredice		$80 \times 80 \dots 135 \times 135$	$40 \times 40 \dots 75 \times 75$
Slabovi		šir. > 600 i deblj. > 80	
Platine		širina $150 \dots 400$ i debljina $10 \dots 80$	
Plosnate gredice			širina $40 \dots 90$ i debljina $20 \dots 40$

Toplo valjana gotova roba prema obliku presjeka dijeli se na profile, plosnate proizvode i cijevi.

Toplo valjani profili obuhvaćaju: željezničke šine sa priborom, nosače, ugaonike, profile za brodogradnju, rudarske profile, betonske čelike, valjane žicu, šipkaste čelike, lamele i mnoge druge vrste sličnih proizvoda, uključujući specijalne proizvode za kotrljajuće dijelove željezničkih vozila: obruče, točkove i monoblokove.

Prema nazivima valjačkih pruga na kojima se profili proizvode, oni se dijele na teške, srednje, luke i fine profile. Toplo valjani profili se po pravilu isporučuju u valjanom stanju, tj. bez termičke obrade.

Tipovi željezničkih i industrijskih šina pobliže se označuju masom dužnog metra šine izraženom u kilogramima.

Tablica 4
ŠINE PROIZVODENE U SFRJ

Nomenklaturna grupa	Naziv	Oblik	Tipovi kg/m
Teški profili	Normalne šine		45 i 49
Srednji profili	Industrijske šine		7, 9, 12 i 22

Prema upotrebi dijele se na šine za željezničke kolosijeke i šine za industrijske kolosijeke. U tablici 4 prikazani su tipovi šina koji se proizvode u SFRJ. U inostranstvu se proizvode drukčiji tipovi, sličnog oblika ali različitih dimenzija i težina.

U kolosiječni pribor spadaju vezice, podložne ploče i pričvrsne pločice. Vezice služe za spajanje tračnica u kolosijeku, podložne ploče za podloge između tračnica i pragova, a pričvrsne pločice za stezanje stopa tračnica uz podložne ploče. Kolosiječni pribor

Tablica 5
KOLOSIKEĆNI PRIBOR

Naziv	Oblik	Teški profili	Srednji profili	Laki profili
Vezice			za željezničke šine	za industrijske šine
Podložne ploče		za željezničke šine	za industrijske šine	
Pričvrsne pločice				za željezničke šine

se proizvodi štancovanjem izvaljanih profila, a po potrebi i naknadnim glodanjem utora u podložnim pločama. Raspodjela po nomenklaturnim grupama data je u tablici 5.

Nosači se dijele na I-nosač i U-nosač, kojima nazivi potječu od toga što im oblik presjeka liči na velika slova I i U. U njihovoj

Tablica 6
NOSAČI

Naziv	Oblik	Teški profili	Srednji profili
I-nosači		Teški nosači I 18...I 140	Laki nosači I 18...I 16
U-nosači		Teški nosači U 18...U 40	Laki nosači U 8...U 16

oznaci se uz ova slova dodaje broj koji označava visinu nosača u centimetrima. Njihova raspodjela po nomenklaturnim grupama prikazana je u tablici 6.

Osim ovih normalnih nosača koji se proizvode na običnim valjačkim prugama sa horizontalnim valjcima postoje još i tzv. univerzalni nosači ili nosači sa širokim stopama za čije valjanje su potrebni specijalni univerzalni valjački stanovi sa horizontalnim i vertikalnim valjcima. Ti nosači se pogrešno nazivaju i »pajnerovi nosači« prema njemačkoj firmi Peine. Dodatno je obilježje univerzalnih nosača da su stranice stopa paralelne, dok je na običnim nosačima unutrašnja stranica stopa ukošena.

Tablica 7
FAZONSKI ČELICI

Vrsta profila	Istokraki ugaonici		Raznorakri ugaonici	
	oblik	dimenzije presjeka $b \times b$, mm	oblik	dimenzije presjeka $a \times b$, mm
Teški profili		80 × 80 ... 200 × 200		60 × 90 ... 100 × 200
Srednji profili		70 × 70 ... 75 × 75		40 × 80 ... 65 × 75
Laki profili		35 × 35 ... 65 × 65		40 × 60
Fini profili		20 × 20 ... 30 × 30		

Fazonski čelici ili ugaonici imaju presjek u obliku istokrakog ili raznokrakog pravog ugla, a označavaju se dužinom jednog i drugog kraka izraženom u milimetrima. Razdioba po grupama prikazana je u tablici 7.

Specijalni profili za brodogradnju jesu: holand-profil ili bulb-plosnati čelici, u stvari plosnati čelici sa zadebljanjem na jednom kraju; bulb-ugaonici, fazonski čelici sa zadebljanjem na jednom

Tablica 8
PROFILI ZA BRODOGRADNJU

Naziv	Oblik	Teški profili širina, mm	Srednji profili širina, mm
Holand-profil		≥ 240	≤ 220
Bulb-ugaonici		115 × 65 ... 380 × 100	
Profili za rebra		≥ 400	

kraju; profili za rebra, U-nosači sa znatno većom visinom i debljim nožicama u odnosu na normalne U-nosače. Ovi profili prikazani su u tablici 8.

Rudarski profili služe za izradu čeličnih podgrada u rudnicima. U svijetu se upotrebljava mnogo različitih oblika ovih profila, koji se svi mogu obuhvatiti u dvije grupe, i to rudarski I-profil i zvonasti profili. Za sada se u našoj zemlji proizvodi samo rudarski I-profil visine 110 mm, koji spada u srednje profile.

Betonski čelici su u stvari šipke kružnog presjeka, a isporučuju se za potrebe građevinarstva bilo u obliku koturova, bilo kao ravne ili jednom savijene šipke. Obični betonski čelik ima glatku površinu, a kvalitetnije vrste imaju rebra po površini (rebrasti betonski čelik) ili su čak hladno deformisani (Tor-čelik, Isteg i sl.). Nomenklaturne grupe za betonske čelike date su u tablici 9.

Tablica 9
BETONSKI ČELICI

Vrste profila	Oblik	Betonski čelik		
		teški mm	srednji mm	laki mm
Obični		Ø > 40	Ø 12...40	Ø 6...10
Rebrasti		Ø > 40	Ø 12...40	Ø 6...10
Deformisani		Ø > 40	Ø 12...40	Ø 6...10

Valjanom žicom nazivaju se koturovi okruglog čelika koji su namijenjeni za dalju preradu hladnim vučenjem. Izuzetno se proizvodi i fazonska valjana žica drukčijeg presjeka (plosnatog, ovalnog, kvadratnog itd.). Valjana žica se proizvodi u dimenzijama Ø 6...14 mm i spada u fine profile.

U šipkaste čelike idu okrugli, poluokrugli, kvadratni, šestougaoni, osmougaoni i plosnati čelici koji se po pravilu isporučuju u šipkama. Tablica 10 sadrži raspored šipkastih čelika po nomenklaturnim grupama. U plosnate čelike idu i tzv. kolske šine. To

Tablica 10
ŠIPKASTI ČELICI

Vrsta	Oblik	Šipkasti čelik			
		teški mm	srednji mm	laki mm	fini mm
Okruglo		≥ 80	28...57	16...27	6...15,5
Poluokruglo				22/11...30/15	8/4...20/10
Kvadratno		≥ 80	25...75	13...24	7...12
Šestougaono			27...41	17...22	10...14
Osmougaono			30	16...20	12...14
Plosnato		50...250/6...40	26...50/5...30	10...25/5...18	

s u ustvari plosnati čelici širine 40...60 mm i debljine 8...15 mm koji služe za okivanje točkova na zaprežnim kolima.

Lamele ili široki univerzalni plosnati čelici u dimenzijama 140...400 mm širine i 10...40 mm debljine sa oštrim ivicama upo-

Tablica 11
ŽELJEZNIČKI TOČKOVI

Proizvod	Oblik	Ø mm
Točak		do 1200
Obruč		do 1500
Monoblok		1500

Tablica 12
SPECIJALNI PROFILI ZA RAZLIČITE PRIMJENE

<i>Teski profili</i>	<i>Srednji profili</i>	<i>Laki profili</i>	<i>Fini profili</i>
Z-profil 80...200 mm	Z-profil 50...80 mm	Z-profil 30...40 mm	Čelik za noževe
T-profil 80...140 mm	T-profil 50...80 mm	T-profil 20...45 mm	Klinasti čelik
	Poštanski profil 40 x 45 x 7	Čelik za kose	Čelik za ručke
	Čelik za lisnate opruge	Segmenti za bačve	Pridržači obruča na osovinskom sklopu
		H-profil za bačve	Čelik za turpije
		Čelik za dna kanti	Čelik za srpove
		Fazonski čelici za brave	Prozorni profili

trebljavaju se za izradu čeličnih konstrukcija. Lamele spadaju u teške profile.

Specijalne proizvode za kotrljajuće dijelove željezničkih vozila prikazuje tablica 11. Montažom po jednog monobloka ili po jednog kompletu točka s navučenim obručem na svaku stranu osovine dobije se osovinski sklop ili kolski slog.

Od ostalih profila veoma širokoga asortimana koji se upotrebljavaju u različnim granama industrije najviše se upotrebljavaju profili dati u tablici 12.

Toplo valjani limovi i trake jesu plosnati proizvodi, tj., za razliku od profila, imaju daleko veći omjer širine prema debljini. Plosnati proizvodi koji se isporučuju u obliku tabli nazivaju se općenito limovima, a plosnati proizvodi manjih debljina (ispod 6 mm), koji se isporučuju u obliku koturova, nazivaju se toplo valjane trake.

Tablica 13
TOPLO VALJANI LIMOVI

Vrsta lima	Debljina mm	Širina mm	Dužina mm
Debeli	≥ 5	do 5000	dogovorno
Srednji	3...4,75	do 2500	dogovorno
Tanki	1...2,75	do 2000	dogovorno
Fini	≤ 1	do 2000	dogovorno

Toplo valjani limovi se prema debljini dijele na debele, srednje, tanke i fine limove, što se vidi iz tablice 13. Treba napomenuti da proizvodnja toplo valjanih tankih i finih limova na zastarjelim valjačkim duo-stanovima sve više odumire. Umjesto njih upotrebljavaju se jeftiniji i kvalitetniji hladno valjani tanki limovi.

Limovi se izrađuju u dimenzijama i kvalitetima čelika koji odgovaraju potrebama mašinogradnje, brodogradnje, elektro-industrije (dinamo- i trafo-limovi), za izradu kotlova i za dalju

Tablica 14
TOPLO VALJANE TRAKE

Naziv toplo valjane trake	Širina trake mm	Debljina trake mm
Uska traka	10...40	1...5
Srednja traka	45...120	1...5
Siroka traka	125...400	1...5
Vrlo široka traka	400...2000	1...5

obradu presovanjem ili dubokim izvlačenjem. Prema potrebi isporučuju se u valjanom, žarenom, normalizovanom ili kaljenom i otpuštenom stanju.

Na osnovu zahtjeva u pogledu kvaliteta površine, limovi se isporučuju kao: obični ili crni limovi koji imaju površinu dobitnu bilo valjanjem bilo termičkom obradom; jedanput dekapirani limovi, čija je površina očišćena luženjem od kovarine; dvaput dekapirani limovi, čija površina mora biti specijalno glatka i čista od kovarine da bi bila zagaranirana sposobnost za duboko izvlačenje; pocinkovani limovi; bijeli limovi, čija je površina prevučena kaljem; lakovani limovi; plastikom prevučeni limovi, itd.

Toplo valjane trake se prema širini dijele na uske, srednje, široke i vrlo široke trake, što je prikazano na tablici 14. Isporučuju se u koturovima koji idu uglavnom na dalju obradu toprom preradom ili luženjem i hladnim valjanjem. Radi povećanja produktivnosti tendencija je da se ide na što veće širine i što veće težine koturova trake. Tako se već sad proizvode u svjetu trake širine do 2000 mm i koturovi mase do 45 t.

Još se uvijek ponegdje proizvodi na zastarjelim postrojenjima tzv. obročni čelik koji se upotrebljava za okivanje bačava i kaca, za vezanje paketa i sl. To je, u stvari, toplo valjana traka u širinama 10...150 mm i u debljinama 1...4 mm.

Toplo valjane cijevi se prema procesu proizvodnje dijele na šavne i bešavne cijevi (v. str. 85).

Šavne ili zavarene cijevi se uslijed napretka tehnike zavarivanja po svojim osobinama sve više približavaju bešavnim cijevima te ih sve više zamjenjuju. Po dimenzijama dijele se na debele, srednje i tanke zavarene cijevi, što je prikazano u tablici 15.

Tablica 15
ŠAVNE CIJEVI

Dimenzije	Debele	Srednje	Tanke
Nazivni promjer cijevi u colima	≥ 2	$1\cdot1\frac{1}{2}$	< 1
Debljina zida u milimetrima	$\geq 3,65$	3,25	$\leq 2,35$

Bešavne cijevi nisu oslabljene uzdužnim sastavom ili šavom jer su proizvedene valjanjem preko trnova. Ranije su se još zvali i Mannesmannove cijevi jer su se valjale po Mannesmannovom postupku, ali s obzirom na to da postoji i nekoliko drugih procesa za proizvodnju bešavnih cijevi, ovaj naziv treba odbaciti. Po dimenzijama se dijele na teške, srednje i luke bešavne cijevi, kao što je prikazano u tablici 16.

Šavne i bešavne cijevi se isporučuju kao: obične ili crne cijevi bez zaštitnog premaza, bituminizirane ili pocinkovane. Krajevi cijevi mogu biti za spajanje pomoću kolčaka, prirubnica, navoja ili su obični, ravno odrezani.

Obične cijevi bez propisanih mehaničkih osobina upotrebljavaju se u instalacijama za vodu, grijanje itd. gdje su pritisci niski. Jače cijevi s garantovanim mehaničkim osobinama upotrebljavaju se za hidraulične vodove, za kotlovske cijevi u industriji nafte, za bušenje bunara, itd. gdje su cijevi podvrgnute visokim pritiscima.

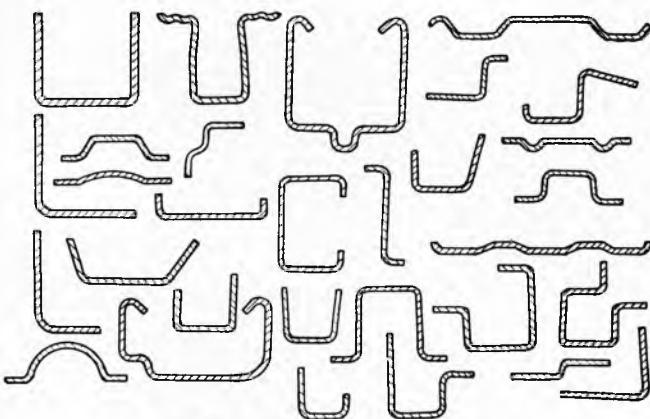
Sprovodne cijevi (line pipe), zaštitne (casing pipe), bušaće cijevi (drill pipe), bunarske cijevi (water-well casing pipe), crpne cijevi (tubing) su samo primjeri raznih naziva cijevi za velike pritiske koje se upotrebljavaju u industriji nafte i u bušačkim radovima pri traženju nafte, vode i u drugim geološkim bušenjima. Glavna razlika između navedenih cijevi jest u načinu kako se među sobom spajaju.

Tablica 16
BESAVNE CIJEVI

Dimenzije	Teške	Srednje	Lake
Vanjski promjer, mm	≥ 191	102…178	≤ 98
Debljina, mm	≥ 5,25	3,25…5,25	≤ 2

Hladno valjani proizvodi. I ovdje se razlikuju hladno valjani profili i plosnati proizvodi.

Hladno valjani profili, ili, bolje rečeno, hladno oblikovani profili, proizvode se na specijalnim postrojenjima gdje se u hladnom stanju pomoću valjaka oblikuje željeni profil iz toplo ili hladno valjanih traka. Ovaj način proizvodnje sve se više razvija jer pruža mogućnost da se dobiju daleko tanji profili, tačnijih dimenzija, boljih površina i komplikovanijeg oblika nego što je to moguće postići toplim valjanjem. Još ne postoji klasifikacija ovih profila, ali već je danas njihov assortiman veoma širok kako po obliku, širinama i debljinama, tako i po površinskoj obradi i zaštiti. Najprije su se upotrebljavali samo za dekorativne svrhe, a danas sve češće nalaze mjesto u odgovornim funkcionalnim i konstrukcijskim elementima gdje zamjenjuju toplo valjane proizvode. Slika 127 prikazuje samo mali broj hladno valjanih profila, ali i iz toga se može razabrati kako raznolike mogućnosti postoje za proizvodnju ovih profila.



Sl. 127. Primjeri hladno valjanih profila

Hladno valjani limovi, kao što je već napomenuto, već su skoro posve zamjenjeni toplo valjane fine i tanke limove.

Klasifikacija hladno valjanih limova na tanke i fine ista je kao i za toplo valjane limove, tj. tanki limovi su u debljinama od 1 do 2,75 mm a fini limovi u debljinama ispod 1 mm. Prema kvalitetu površine, odnosno antikorozijske zaštite, hladno valjani limovi se, kao i toplo valjani limovi, isporučuju kao: obični limovi (njihova je površina sjajna uslijed luženja i hladnog valjanja za razliku od toplo valjanih crnih limova), kao pocinkovani, bijeli, lakirani, prevučeni plastičnim masama itd.

Hladno valjane trake se dijele slično kao i toplo valjane trake na grupe koje su prikazane u tablici 17.

Tablica 17
HLADNO VALJANE TRAKE

Naziv hladno valjane trake	Širina trake mm	Debljina trake mm
Fina traka	5…100	0,1…3
Uska traka	101…200	0,18…5
Srednja traka	201…300	0,18…5
Široka traka	301…395	0,18…5
Vrlo široka traka	≥ 400	0,18…5

Tendencija je da se uže dimenzije traka dobivaju uzdužnim sjećenjem širokih traka. Isporučuju se u koturovima, bilo u hladno valjanom stanju, bilo u žarenom stanju s dodatnom hladnom redukcijom (*dresiranjem*) radi postizanja određenih mehaničkih svojstava. Kao i kod limova, površinsko oplemenjivanje može se izvršiti pocinkovanjem, kalajisanjem, lakiranjem, prevlačenjem plastičnim masama itd.

Hladno vučeni proizvodi. U hladno vučene proizvode ubrajaju se vučeni šipkasti čelici, vučena žica i vučene cijevi.

Tablica 18
HLADNO VUČENI ŠIPKASTI ČELICI

Vrsta	Hladno vučeni šipkasti čelik		
	Srednji, mm	Laki, mm	Fin, mm
Okrugli	31…50	15…30	12…14
Kvadratni	32…50	15…30	6…14
Šestougaoni	32…50	17…30	6…14
Plosnati	55 × 20…100 × 40	25 × 1 … 50 × 20	4 × 1 … 22 × 10

Hladno vučeni šipkasti čelici isporučuju se u hladno vučenom žarenom ili kaljenom i otpuštenom stanju. Assortiman ovih čelika prikazan je u tablici 18. Po potrebi mogu se proizvoditi hladnim vučenjem i različiti drugi profili, kao npr. oštrobridni ugaonici, čelici za opruge i dr.

Ako se zahtijevaju ne samo tačne dimenzije nego i vrlo čista površina okruglog čelika, šipke se okruglog čelika podvrgavaju ljuštenju, tj. skidanju površinskog sloja tokarenjem, ili brušenju površine cijele šipke. Postoje specijalni strugovi i brusilice na kojima se mogu na ovaj način obradivati okrugle čelične šipke do promjera 200 mm i u dužinama od 12 m. Ovakvom obradom postiže se ISA-tolerancija H 11.

Hladno vučena žica prema dimenzijama dijeli se na debelu, srednju, tanku i finu žicu, kao što je prikazano u tablici 19. Vučena žica se po pravilu isporučuje u koturovima a samo iznimno u šipkama.

Mehaničke osobine žice zavise od hemijskog sastava čelika, stepena hladne redukcije i termičke obrade. Višestepenim hladnim vučenjem bez medufaznog žarenja nastaje tvrda žica. Žarenjem tvrde žice dobije se vučena meka žica. Ako se nakon žarenja žica podvrgne određenom stepenu hladne redukcije, dobije se žica određene tvrdoće u rasponu između meke i tvrde žice. Tako nastaje vučena žica $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$ tvrda. Treba posebno spomenuti patentiranu žicu koja se proizvodi naizmjeničnim vučenjem žice od visokougljeničnog čelika i njenim kaljenjem u kupci od rastopljenog olova. Ovakvim procesom patentiranja postižu se veoma dobre mehaničke osobine. Već su ostvarene čvrstoće na istezanje preko 250 kp/mm² uz dovoljnu žilavost, što omogućava korištenje patentirane žice za muzičke instrumente, čeličnu užad, opruge itd.

Tablica 19
HLADNO VUČENA ŽICA

Oblik	Vučena žica			
	Debeli, mm	Srednja, mm	Tanka, mm	Fina, mm
Okrugla	5 ··· 14	2 ··· 4,9	1,1 ··· 1,9	0,14 ··· 1
Poluokrugla	5,7 × 2,85 ··· 9,7 × 4,85	2,6 × 1,35 ··· 4,7 × 2,35	1,6 × 0,8 ··· 2,5 × 0,9	0,9 × 0,4
Kvadratna	2,5 × 2,5 ··· 7 × 7			
Plosnata	2 × 4 ··· 4 × 10			

Prema izgledu površine žice, odnosno prema zaštitnoj prevlaci, razlikuju se: svijetlovučena žica bez ikakve dorade, tamnožarena žica, pocinkovana žica, kalajem prevučena žica, pobakrena žica, aluminijumom prevučena žica, lakovom prevučena žica, plastičnim masama prevučena žica itd.

Od vučene žice proizvode se ekseri (čavli), zakovice, zavrtnji, elektrode za zavarivanje, žičane mreže, armature za prednepregnuti beton, lanci, opruge, čelična užad, žice za muzičke instrumente i drugi proizvodi u metaloprerađivačkoj industriji.

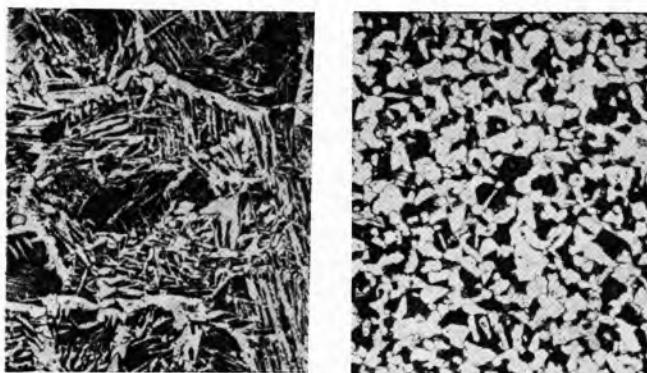
Hladno vučene cijevi dijele se, prema debelini zida, na cijevi sa debelim zidom iznad 4 mm, normalnim zidom od 2 do 3,9 mm, tankim zidom od 1 do 1,9 mm, naročito tankim zidom od 0,5 do 0,9 mm.

Kao i ostali vučeni proizvodi, i vučene cijevi mogu da se isporuče u svijetlovučenom tvrdom stanju, u žarenom stanju ili, ako su posrijedi čelici s većim sadržajem ugljenika, u normalizovanom stanju.

M. Grgić

TERMIČKA OBRADA ČELIKA

Termička obrada je postupak ili skup postupaka pri kojima se materijal podvrgava promjenama temperature da bi dobio određene osobine. Struktura koju čelik dobiva u toku procesa proizvodnje i prerade nije uvijek ona koja mu daje optimalne osobine; termičkoj je obradi zadatak da u takvim slučajevima promjeni strukturu tako da se osobine čelika poboljšaju. Primjera radi prikazana je u sl. 128 struktura livenog čelika sa 0,3% C, a desno struktura istog čelika nakon normalizacionog žarenja,



Sl. 128. Primjer djelovanja termičke obrade na strukturu čelika. Lijevo: Widmannstättenova struktura čelika naglo ohlađenog pri livenju, desno: struktura istog čelika nakon normalizacionog žarenja

jednog od vidova termičke obrade. Naglo ohlađen pri lijevanju čelik ima grubu i igličastu (Widmanstättenovu) strukturu, koja je uzrok krtosti; nakon normalizacije struktura je finozrnata, te je čelik žilav i plastičan. Mehanička ispitivanja takvog čelika prije i poslije normalizacionog žarenja dala su ove rezultate:

Stanje	Granica razvlačenja kp/mm ²	Čvrstoća kp/mm ²	Istezanje %	Kontrakcija %	Udarna žilavost kpm/cm ²
Nežareno	24	51	15	14	3
Žareno	30	52	27	39	8

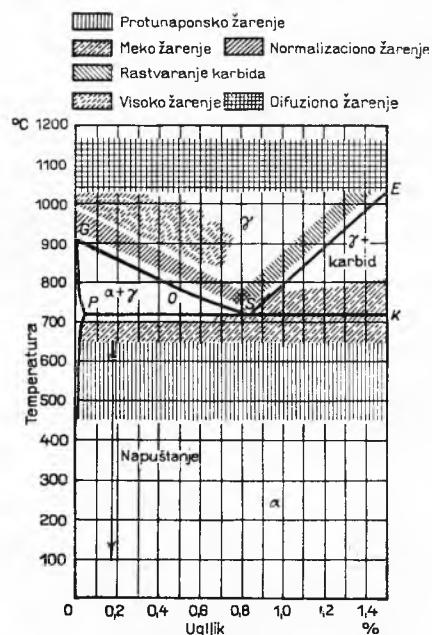
U postupke termičke obrade ubrajaju se i postupci pri kojima se kombinovanjem promjene temperature sa hemijskim uticajima na površinu čeličnih proizvoda postiže njihovo površinsko očvršćavanje (cementacija, nitriranje, cijanizacija).

Izbor postupka termičke obrade kojim se postiže poboljšanje strukture u cijelom komadu ili samo na površini zavisi od hemijskog sastava čelika, polazne strukture, dimenzije komada i osobina koje se žele postići. Mogućnosti termičke obrade datog čelika mogu se razabratи iz dijagrama stanja, a putovi praktične provedbe iz dijagrama TT (v. poglavlje Struktura čelika u ovom članku).

Termičkoj obradi podvrgavaju se konstrukcioni dijelovi mašina i uređaja i alati od ugljičnog čelika, a osim toga praktično sve izradevine od specijalnih čelika. Masovnim trgovačkim čelicima redovito se ne korigira struktura termičkom obradom jer nedostaci u njihovoj strukturi ne utiču na njihovu praktičnu primjenljivost. U pogledu veličine predmeta koji se mogu podvrgnuti postupcima termičke obrade nema ograničenja: termički se obraduju kako komadi minijaturnih dimenzija tako i teški otpresici mase nekoliko desetina tona.

Najvažniji postupci termičke obrade, koji se primjenjuju u različitim modifikacijama, jesu žarenje, kaljenje, napuštanje, hemijsko-termička površinska obrada i otvrdnjavanje izlučivanjem. Kombinacija kaljenja i napuštanja, koja se primjenjuje naročito na konstrukcione čelike, naziva se *poboljšanje*.

Žarenje. Pod tim izrazom razumijeva se zagrijavanje čelika na određenu temperaturu i njegovo držanje na toj temperaturi, nakon čega se on (po pravilu sporu) ohlađuje na običnu temperaturu. Temperature i postupci žarenja zavise od vrste čelika i od efekta koji se u određenom čeličnom proizvodu želi postići. U praksi se izvode najčešće ovi načini žarenja: difuziono žarenje,



Sl. 129. Dio dijagrama Fe-C s područjima temperature najvažnijih žarenja za ugljične čelike

normalizaciono žarenje, meko žarenje, rekristalizaciono žarenje i žarenje radi odstranjenja napona. Temperature žarenja se načelno mogu razabratи za čelične određene sastava iz dijagrama stanja (sl. 129 prikazuje u dijagramu Fe-C područja temperature najvažnijih žarenja za ugljične čelične). Vrijeme držanja na temperaturi žarenja zavisi i od dimenzija komada koji se žari (tj. od njih zavisi skala vremena u dijagramu TT) i od samog postupka termičke obrade.

Difuziono žarenje ima svrhu da se nehomogenosti hemijskog sastava unutar čeličnog predmeta uklone difuzijom (u čvrstom stanju) nejednoliko raspodijeljenih elemenata sa mjesta veće koncentracije na mjesta manje koncentracije. Razlike u koncentraciji nekih od pratećih elemenata pojavljuju se u ingotu prilikom livenja i ta se pojava naziva *segregacijom* (likvacijom, iscejanjem), ona se preradom u vrućem stanju ne može ukloniti, pa može da negativno utiče na mehaničke osobine čelika, naročito u pravcu poprečnom na pravac deformacije pri toploj preradi. Difuzija u čvrstom stanju je općenito spor proces, a ovdija se to brže što je viša temperatura. Stoga se difuziono žarenje vrši na temperaturama od 1050 do 1300 °C, a efekat mu je to veći što ono duže traje. Usljed dugog držanja na visokoj temperaturi kristali čelika rastu, te nastalu krupozrnatu strukturu treba razoriti daljom toploim preradom. Stoga se difuziono žarenje po pravilu vrši prije vruće prerade.

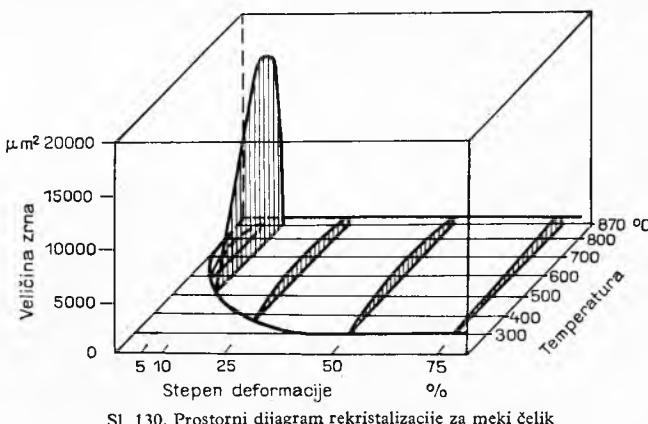
Normalizaciono žarenje, kratko zvano i *normalizacija*, od svih postupaka žarenja u praksi se najviše primjenjuje. Pri tom žarenju čelik se zagrije 20–30 °C iznad temperaturu Ac_3 ako je podeutektoidan, a 15–50 °C iznad Ac_1 ako je nadeutektoidan, i onda se ohladi na mirnom zraku. Pri grijanju α -željezo prelazi u γ -željezo, a pri hlađenju ovo se pretvara u α -željezo, ali uz pogodnu brzinu hlađenja nastaje sitnozrnata struktura i čeliku se poboljšaju svojstva (v. sliku 128 i tablicu na str. 96). Pri normalizaciji nekih specijalnih čelika, kad treba rastvoriti karbide, i nadeutektoidni čelični griju se iznad A_{cm} ; u nadeutektoidnim ugljičnim čelicima žarenje iznad A_{cm} izazvalo bi pregrubo zrno i obrazovanje mreže tvrdog i krtog cementita. Brzina hlađenja znatno utiče na veličinu zrna: brže hlađenje daje sitniju strukturu. Ako je struktura čelika vrlo gruba, treba normalizaciono žarenje i ponoviti više puta. Normalizacija se provodi radi poboljšanja osobina livenog, vruće ili hladno valjanog i kovanog čelika, također čelika koji je starenjem postao krt. Često se čelik normalizuje prije kaljenja da bi se postigla što ravnomjernija struktura.

Meko žarenje. Čelici sa $> 0,5\%$ C u kojima je tvrdi cementit u obliku lamela perlita ili u obliku karbidne mreže teško se obraduju skidanjem strugotine. Grijanjem podeutektoidnih čelika na temperaturu nešto ispod Ac_1 , ili na temperature koje osciliraju oko Ac_1 , a nadeutektoidnih najbolje na temperaturu između Ac_1 i Ac_{cm} , lamele i mreža se raspadaju na sitne kuglice, koje odgovaraju ravnotežnoj strukturi (v. str. 51 i sl. 16). Nakon polaganog hlađenja ta se struktura zadrži i na običnoj temperaturi. Opisani postupak, kojim se čelik omekšava, naziva se mekim žarenjem. Budući da kuglice zrnatog cementita izmjuši pred oštricom noža, čelik takve strukture lako se obrađuje. Tako omekšani čelik lako se i hladno obraduje valjanjem ili izvlačenjem. Osim za omekšavanje čelika, meko žarenje se praktikuje u nekim slučajevima i prije kaljenja radi ravnomjernije raspodjele karbida u osnovnoj masi, čime se postiže veća homogenost strukture kaljenog čelika.

Žarenje za uklanjanje napona. Nakon tople prerade, zavarivanja ili termičke obrade čeličnih proizvoda nastaju u njima uslijed neravnomjernog hlađenja unutrašnja naprezanja koja mogu doći ili prekoračiti granicu razvlačenja dotičnog čelika, te nastaju deformacije predmeta ili, ako se ta unutrašnja naprezanja sumiraju s pogonskim radnim naprezanjem, mogu dovesti i do loma bez prethodne deformacije. Ti unutrašnji naponi mogu biti još veći ako ima u strukturi više različitih sastojaka. Oni se mogu ukloniti žarenjem na temperaturi ispod Ac_1 i ispod temperature napuštanja (jer je bilo kakva promjena strukture pri tom nepoželjna). Obično se čelik radi uklanjanja napona žari na 450–650 °C. Hlađenje nakon žarenja treba da je sasvim sporo, kako ne bi ponovo nastala unutrašnja naprezanja.

Rekristalizaciono žarenje. Pri preradi čelika hladnom deformacijom (valjanju, vučenju) kristalna zrna se deformiraju i raz-

vuku, granice među njima se u mikroskopskoj slici strukture deformiranog predmeta postepeno gube, a plastičnost mu opada tako da je nakon određenog stepena deformacije dalja plastična deformacija nemoguća (v. str. 74). Zagrijte li se deformirani čelik na određenu temperaturu, iz uništene kristalne strukture se ponovo stvaraju kristali, nastaje *rekristalizacija* čelika, i čelik se opet može plastično deformirati. Taj se postupak uklanjanja otpora deformaciji naziva rekristalizacionim žarenjem. Temperatura na kojoj počinje rekristalizacija i veličina kristala koji pri tom nastaju zavise — osim od hemijskog sastava čelika — u velikoj mjeri od stepena deformacije kojoj je on bio podvrgnut i od vremena kroz koje se žarenje produžuje. Temperatura na kojoj počinje rekristalizacija to je niža što je stepen deformacije bio veći. (Producenim žarenjem može se postići rekristalizacija i na još nižoj temperaturi.) Veličina zrna, počevši od određenog stepena deformacije, sa stepenom deformacije općenito opada, ali na nižim stepenima deformacije može postići maksimum čija visina zavisi od temperature žarenja. Ti su odnosi prikazani, primjera radi, na sl. 130 u prostornom dijagramu rekristalizacije za meki čelik. Stepen deformacije i temperatura koji daju najgrublje zrno zovu se kritični stepen deformacije i kritična temperatura rekristalizacije. Njih treba općenito izbjegavati kad je svrha rekri-



Sl. 130. Prostorni dijagram rekristalizacije za meki čelik

stalizacionom žarenju da se čeliku vrati duktilnost, jer je u tom slučaju poželjno što finije i ravnomjernije zrno. Grubo je zrno poželjno u transformatorskom limu od legura Fe-Si jer se njime smanjuju gubici pri premagnetiziranju.

Kaljenje. Pod tim se izrazom razumijeva hlađenje čelika, prethodno zagrijanog na temperaturu iznad Ac_3 (podeutektoidni čelici) ili Ac_1 (nadeutektoidni), sa temperature iznad Ar_3 odn. Ar_1 tolikom brzinom da se na površini ili po cijelom presjeku čeličnog predmeta postigne znatno povećanje tvrdoće, po pravilu uslijed stvaranja martenzitne strukture. Kaljenje je svrha ili da se čeliku poveća tvrdoća i otpornost protiv habanja ili, u kombinaciji s napuštanjem, da mu se poveća žilavost i odnos granice razvlačenja prema zateznoj čvrstoći.

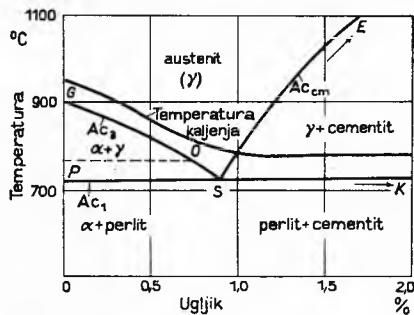
Theorijske osnove kaljenja obradene su u poglavljju Struktura čelika u ovome članku (str. 50). Tamo je rečeno kako se informacije o temperaturi austenitizacije, temperaturi kaljenja i kritičnoj brzini hlađenja za stvaranje martenzita mogu razabratи iz dijagrama stanja i dijagrama TT i kako na te temperature, na brzinu hlađenja, na prokaljivost, na osjetljivost prema pregrijanju i na osobine kaljenog čelika utječe sastav čelika, napose sadržaj legirajućih elemenata. (O utjecaju pratećih i legirajućih elemenata vidi i poglavljje Osobine čelika u ovome članku.) U pogledu osobina kaljenog čelika treba još reći da je za maksimalnu tvrdoću koja se može postići praktično mjerodavan isključivo sadržaj ugljika otopljenog u austenitu na temperaturi kaljenja. Tvrdoće HR C $\geq 60 \text{ kp/mm}^2$ mogu se postići samo ako je sadržaj ugljika iznad $\sim 0,5\%$. S tvrdoćom raste i zatezna čvrstoća, a istezanje, kontraktacija i udarna žilavost opadaju (tj. povećava se krtost). Kaljenjem čelika sa $\sim 0,3\%$ C tvrdoća raste manje, ali se često postiže isti učinak kao pri poboljšanju drugih čelika, tj. postiže se razmjerno velika čvrstoća uz veliku žilavost. Kaljenjem čelik postaje i magnetski tvrdi, tj., u poređenju sa žarenim, kaljeni čelik ima veću koercitivnu silu uz malu indukciju.

Brzina hlađenja uz inače iste uvjete (isti čelik, iste dimenzije i isto stanje površine kaljenog komada) zavisi od temperature sredstva za hlađenje i od koeficijenta prelaza topote sa površine čelika na sredstvo za hlađenje. Koeficijent prelaza topote zavisi od prirode sredstva za hlađenje, od razlike temperature i od brzine i načina relativnog kretanja sredstva za hlađenje u odnosu na čelik koji se koli. Ako se u praksi upotrebljavana sredstva za kaljenje poređaju prema rastućoj intenzivnosti djelovanja (prema njihovoj »jakosti«), dobiva se ovaj slijed: zrak, voda na 80–100 °C, hladne čelične čeljusti (kojima se toplinski vodljivo obuhvati dio komada koji treba zakaliti), struja komprimiranog zraka, loj, zasićeni rastvori soli na 80–200 °C, uljne emulzije sa ~10% ulja, voda na 20 °C, ledena voda (0 °C), razrijedjeni rastvori soli. Upotrebom različitih sredstava za kaljenje na različitim temperaturama nastoji se postići da se i postiže potrebljana kriva hlađenja prema dijagramu TT i smanjuje mogućnost prskanja čelika uslijed deformacija zbog naglih promjena volumena. Redovito treba da sredstvo za kaljenje djeluje tako da je brzina hlađenja u temperaturnoj oblasti perlitnog preobražaja veća, a u oblasti stvaranja martenzitne strukture manja. U niže navedenoj tablici date su radi orientacijske uporedbe brzine hlađenja nekim tipičnim sredstvima za hlađenje na dva temperaturna područja kroz koja prolazi temperatura čelika prilikom kaljenja.

Sredstvo za hlađenje	Brzina hlađenja, °C/s, u temperaturnom području:	
	650–550 °C	300–200 °C
Voda 18 °C	600	270
Voda 50 °C	100	270
10%tni rastvor NaCl	100	300
Sapunica	30	200
Mineralno ulje	125	35
Čelične čeljusti	35	15
Olovna kupka	450	50

Danas se u praksi najčešće primjenjuju ovi postupci kaljenja: obično (normalno) kaljenje, kombinovano kaljenje, kaljenje u toploj kupki, površinsko plameno kaljenje i površinsko induktivno kaljenje.

Obično ili normalno kaljenje je postupak pri kojem se čelik neprekidno hlađi u sredstvu za kaljenje (obično vodi ili ulju) do ispod temperature 150–100 °C. Podeutektoidni čelici se kale sa temperature 30–50 °C iznad Ac_3 , tj. iz čisto austenitnog područja. Kad bi se i nadeutektoidni čelici prije kaljenja grijali do stvaranja čiste austenitne strukture, tj. na temperature iznad Ac_{cm} , struktura bi im na toj visokoj temperaturi postala krupnoprznata i uzrokovala krtost čelika. Stoga se nadeutektoidni čelici kale s temperaturom ispod Ac_{cm} a 30–50 °C iznad Ac_1 (sl. 131).



Sl. 131. Dio dijagrama Fe-C s temperaturama kaljenja za ugljične čelike

Na tim temperaturama u nadeutektoidnom čeliku ostaje nerasvoren jedan dio cementita koji može obrazovati mrežu oko zrna austenita i uzrokovati krtost. U takvom slučaju potrebno je prije kaljenja normalizacijom (v. gore) cementitnu mrežu pretvoriti u zrnati cementit. U nekim slučajevima temperature kaljenja mogu biti i više od upravo navedenih, npr. kad austenitni čelik treba da i nakon kaljenja zadrži austenitnu strukturu ili kad treba prije ohladijanja rastvoriti karbide (o tome v. poglavje Struktura čelika u ovom članku). Tako temperatura kaljenja austenitnih

čelika (koje se u ovom slučaju naziva i *gašenje*) iznosi 1000–1100 °C, a brzoreznog čelika sa 4% Cr i 18% W, 1250–1280 °C. Na temperaturi kaljenja treba čelik držati dovoljno dugo da se progrije komadi koji se koli i da se rastvore karbidi.

U praksi se vrlo često temperatura kaljenja određuje pomoću *kalilnog reda*: više se proba istog čelika koli sa nekoliko različitih temperatura u istom sredstvu za hlađenje i zatim lomi. Optimalna je temperatura kaljenja ona uz koju je dobiven prelom najfinijeg zrna.

Direktno kaljenje nakon tople prerade dosta rijetko se primjenjuje; ono ima ekonomsku prednost da se iskorištava postojeća topota, ali mu je nedostatak da je pri tom teško održati ravnomjernu temperaturu kaljenja.

Kombinovano kaljenje. Pri običnom kaljenju u jakim rashladnim sredstvima (npr. u vodi) nastaju u momentu stvaranja martenzita (zbog njegovog većeg specifičnog volumena) jaki unutarnji naponi koji mogu izazvati pucanje kaljenog komada. Da bi se izbjegla ova opasnost i istovremeno osigurala potrebljana brzina hlađenja u kritičnim područjima, primjenjuje se kombinovano kaljenje u dva sredstva za hlađenje: najprije se hlađi u jakom sredstvu za hlađenje, redovito u vodi, a čim se (prema dijagramu KTT) pređe kritična temperaturna oblast feritno-perlitnog preobražaja, komad se odmah prenosi u slabije sredstvo za hlađenje, npr. u ulje, gdje se daljim (sporijim) hlađenjem stvara martenzit. Nedostatak je tog postupka što je nemoguće precizno kontrolirati temperaturu komada u toku kaljenja.

Kaljenje u toploj kupki u osnovi ima istu svrhu kao i kombinovano kaljenje, ali se izvodi na način koji omogućava tačnu kontrolu onih faza rada koje su bitne. Čelik se najprije ohladi u solnoj ili metalnoj kupki kojoj je temperatura tačno poznata, a nešto je iznad temperature stvaranja martenzita prema dijagramu TT; pošto se temperatura u komadu izjednačila s temperaturom kupke, komad se ohladi na zraku, pri čemu se stvara martenzitna struktura pod uvjetima pogodnim za smanjenje unutrašnjih napona. Zbog ograničenog vremena koje je na raspolaganju za izjednačavanje temperature u toploj kupki, ovaj se postupak upotrebljava prvenstveno za kaljenje manjih komada.

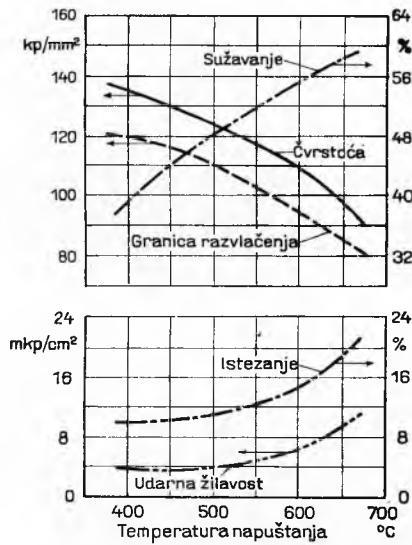
Površinsko kaljenje primjenjuje se na dijelove mašina i konstrukcija od kojih se u toku rada zahtijeva da imaju tvrdu površinu a žilavu i dovoljno čvrstu sredinu. Površinsko kaljenje zahtijeva u prvom redu specifičnu tehniku zagrijavanja samo površine koja se podvrgava kaljenju. Trebalo bi da temperatura na koju se površina zagrijava odgovara temperaturama običnog kaljenja, ali se praktično, zbog specifičnog načina zagrijavanja, računa s nešto višim temperaturama. Nakon zagrijavanja čelik se koli u mlazu vode ili potapanjem.

U praksi postoje tri načina površinskog zagrijavanja: plameno, induktivno i kontaktno zagrijavanje (zagrijavanje potapanjem), pa se i postupci kaljenja prema tome zovu plameno, induktivno i kontaktno kaljenje ili kaljenje potapanjem. *Plameno zagrijavanje* obavljaju se pomoću plinskih gorionika. Kvalitet plina i kapacitet, raspored i brzina kretanja gorionika određuju dubinu zagrijanog sloja; dubinu zakaljenog sloja određuje, osim dubine zagrijanog sloja, i količina vode za hlađenje. Ta dubina kaljenja iznosi kod plamenog kaljenja od 2 do 6 mm. Tačna kontrola temperature kaljenja pri plamenom kaljenju nije moguća, pa se u pogledu dubine kaljenja ne postižu uvek predviđeni rezultati, a može se lako dogoditi da se površina čelika pregrije. Tih nedostataka nema zagrijavanje električnom strujom koja se indukuje u zagrijanom komadu. Pri *induktivnom kaljenju* predmet se ulazi u brzo promjenljivo elektromagnetsko polje, pa se u njemu indukuje struja, i to, zbog tzv. skin-efekta, na njegovoj površini; uslijed toga se predmet na površini zagrije razvitom Jouleovom toplinom. Dubina zagrijanog sloja uglavnom zavisi od frekvencije izmjenične struje kojom se generira elektromagnetsko polje: sa frekvencijama od 3 do 1000 kHz postižu se dubine kaljenja od 1,5 do 0,25 mm. Treći način kaljenja, *kaljenje potapanjem ili kontaktno*, tj. uz zagrijavanje kratkim uronjavanjem u tople kupke, rjeđe se primjenjuje.

Za površinsko kaljenje uzimaju se ugljični i niskolegirani čelici sa sadržajem ugljika od 0,35 do 0,70%. Taj je postupak naročito pogodan za serijski rad.

Neki specijalni postupci kaljenja koji predstavljaju modifikacije upravo navedenih, primjenjuju se u specijalnim slučajevima. *Svjetlo kaljenje* provodi se u svim fazama u zaštitnoj atmosferi ili solnim kupkama, da se spriječi oksidacija površine i ona zadrži svjetla. *Strujo kaljenje* izvodi se jekom vodenim mlagom ili pod prskalom (tušem), a primjenjuje se za zakaljivanje šupljih ili zavučenih konstrukcionih elemenata. *Kaljenje sa samonapuštanjem* je kaljenje radnih dijelova alata u vodi i otpuštanje do određenih temperatura vlastitom toplotom kaljenog komada. *Kaljenje na temperature ispod nule* kombinirano je kaljenje pri kojemu se predmet najprije ohladi do sobne temperature u običnom sredstvu za hlađenje, a zatim se prebacuje u tečni dušik, suhi led, čvrsti ugljen-dioksid, freon i sl., da bi se u čeliku s postojanim austenitom postigla potpunija martenzitna struktura. *OCe-postupak* je vrsta površinskog kaljenja pri kojem se predmet potpuno progrije na temperaturu kaljenja i onda hlađi na temperaturu tik iznad M_s , tj. u toploj kupki od $\sim 200^\circ\text{C}$, a kad se i ta temperatura izjednači, hlađi se dalje na zraku. Na površini nastaje tanki sloj kubnog martenzita, tj. martenzita bez napona, a jezgra ostaje žilava jer se tamo ne prekoračuje kritična brzina hlađenja. O izotermnom ili bainitnom kaljenju ili poboljšanju bit će govora u narednom odsjeku.

Poboljšanje i otpuštanje. Čelik se rijetko upotrebljava u kaljenom stanju bez dalje termičke obrade jer je u tom stanju suviše tvrd i nedovoljno žilav, a ima i jake unutrašnje napone.



Sl. 132. Primjer dijagrama zavisnosti mehaničkih osobina čelika od temperature napuštanja

Redovito se čelik nakon kaljenja zagrijava na neku temperaturu ispod A_1 , da bi se stvorila struktura koja je stabilnija i koja uslovjava željene mehaničke osobine. To se zove napuštanje, a kombinacija kaljenja i napuštanja na više temperature, poboljšanje. O strukturnim promjenama koje nastaju pri napuštanju bilo je govora u poglavljiju o strukturi čelika u ovome članku (str. 51). Napuštanje radi poboljšanja provodi se na temperaturama između 450 i 700°C . Što je temperatura napuštanja viša to više opada tvrdoća, čvrstoća i granica razvlačenja, a porast istezanje, kontrakcija i udarna žilavost. Napuštanjem na najvišoj temperaturi postiže se osobine čelika u meko žarenom stanju. Temperatura napuštanja bira se prema željenoj kombinaciji čvrstoće i žilavosti; pri tom su izboru korisni dijagrami zavisnosti mehaničkih osobina od temperature napuštanja (sl. 132) izrađeni za većinu čelika koji se podvrgavaju poboljšanju.

Čelik se obično drži na temperaturi napuštanja 1...3 sata i poslije toga se lagano hlađi. Iznimno se čelici koji sadrže mangan i/ili krom nakon napuštanja u intervalu od 600 do 450°C hlađe brzo, da se izbjegne tzv. krtost napuštanja, koja nastaje uslijed procesa izlučivanja koji nastupaju pri sporom hlađenju u tom temperaturnom intervalu. Krtost napuštanja može se izbjegići i manjim dodacima molibdena i volframa.

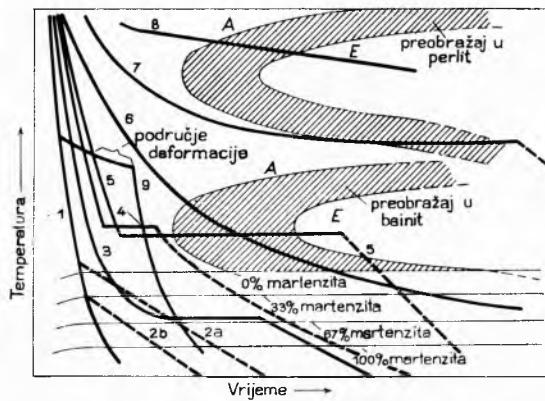
Poboljšanju se podvrgavaju pretežno ugljični i niskolegirani konstrukcijski čelici (koji treba da budu i žilavi i dovoljno čvrsti) i, po pravilu, neke vrste alatnih čelika, npr. legirani alatni čelici za rad u vrućem stanju (koji pri napuštanju zadržavaju tvrdoću). Drugi alatni čelici, od kojih se traži da budu tvrdi na nižim temperaturama, ne napuštaju se na temperaturi iznad 450°C nego se zagrijavaju nakon kaljenja na temperature do 300°C , da bi se smanjili unutrašnji naponi i da se spriječe dalje strukturne promjene koje bi mogle nastati u toku upotrebe alata. To zagrijavanje na nižim temperaturama zove se *otpustanje*. Alati koji su u toku rada izloženi habanju otpuštaju se do 200°C , a alati izloženi udarima i naprezanjima na savijanje otpuštaju se na temperaturama od 150 do 300°C . U praksi se temperatura otpuštanja često kontrolira posmatranjem boja koje nastaju na svjetloj površini čelika kad se on grije na sve višu temperaturu. Tako npr. na 200°C površina postaje bijeložuta, na 240° smeđa, na 280° ljubičasta, na 320° svjetloplava. U novije vrijeme čelici se otpuštaju i u solnim kupkama jer se tako temperatura može mnogo preciznije regulirati i kontrolirati.

Bainitno poboljšanje i patentiranje. Među postupke poboljšanja ubrajaju se i dva postupka termičke obrade kojima se postižu osobine čelika slične osobinama čelika kaljenog pa napuštenog, ali ne tim kombiniranim operacijama preko martenzita, nego izravno specijalnim hlađenjem sa temperature kaljenja. To su: bainitno poboljšanje (zvanо također izotermno kaljenje) i patentiranje.

Bainitno poboljšanje provodi se tako da se čelik sa temperaturom kaljenja naglo ohladi u toploj kupki na određenu temperaturu u području bainitnog preobražaja (dakle iznad temperature početka stvaranja martenzita), na toj temperaturi drži do potpunog preobražaja austenita u bainit, a onda bilo kako ohladi na sobnu temperaturu (v. krivu 5 u sl. 133). Na taj način postiže se velika žilavost uz vrlo veliku čvrstoću, izbjegava se opasnost od prskanja skopčana s postankom martenzita, a svođenje postupka na jednu operaciju može povećati ekonomičnost. Danas se bainitnom poboljšanju sve više podvrgavaju mali predmeti od konstrukcionog čelika, naročito opruge, ali i alatni čelici.

Patentiranje je postupak kojemu se podvrgava žica između dva vučenja da bi se moglo nastaviti hladno izvlačenje (v. str. 92). Ono se izvodi tako da se žica sa temperaturom kaljenja ohladi na određenu temperaturu u donjem dijelu područja perlitnog preobražaja (obično u olovnoj kupki na $450\text{--}500^\circ\text{C}$), na njoj ostavi do završetka perlitnog preobražaja i onda na zraku ohladi na običnu temperaturu. (V. krivu 7 na sl. 133). Postiže se vanredno finolamelarna perlitra struktura (»sorbitna«) visoke žilavosti; pri daljem hladnom izvlačenju žica postiže veliku čvrstoću.

Termomehanička obrada, zvana u anglosaskoj literaturi takođe *ausforming* (od engl. *austenite* i *forming*) jest postupak koji se sastoje u tome da se čelik najprije grijanjem na visoku temperaturu prevede u austenitno stanje, a pri hlađenju ispod temperature rekristalizacije (po pravilu $600\text{--}400^\circ\text{C}$) toplo-hladno de-



Sl. 133. Postupci termičke obrade čelika u dijagramu ITT. 1 Normalno kaljenje, 2 kombinirano kaljenje, 3 kaljenje u toplim solnim rastvorima, 4 kaljenje u toploj kupki, 5 bainitno poboljšanje, 6 blago poboljšanje, odgovara npr. kaljenju velikih komada od legiranog čelika, daje miješanu bainitno-martenzitnu strukturu, 7 patentiranje, 8 normaliziranje, 9 termomehanička obrada

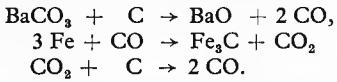
formira dok je još u austenitnom stanju, prije nego počne pretvorba u martenzit (v. krivu 9 na sl. 133).

Na sl. 133 prikazani su naprijed opisani postupci termičke obrade u jednom dijagramu ITT.

Hemijsko-termička obrada ima u osnovi istu svrhu kao površinsko kaljenje, a primjenjuje se kad su zahtjevi u pogledu tvrdoće površine i/ili žilavosti jezgre veći (npr. za zupčanike i alate) iako izvrgnute habanju i zamoru pritiskom ili udarima). Sastoji se u tome da se površine konstrukcionih dijelova obogaćuju ugljikom i/ili dušikom, elementima koji tako povećavaju tvrdoću čelika. Ovo obogaćivanje se vrši putem difuzionih procesa pri višim temperaturama i ograničava se na plitki površinski sloj od nekoliko desetaka mikrometara do nekoliko milimetara. Pored difundiranja elemenata otvrđnjavanja na površinu čelika, ovi postupci uključuju i poboljšanje ili otpuštanje, i to u nekim slučajevima prije, a u nekim i poslije obogaćivanja površine elementima otvrđnjavanja. Glavni postupci hemijsko-termičke obrade jesu cementacija, nitriranje i cijanizacija. U postupke hemijsko-termičke obrade spada i difuziona metalizacija tj. obogaćivanje površine metalima, kao npr. aluminijumom i kromom. Ovi postupci se nazivaju alitiranje, odn. kromiranje i imaju za cilj da povećaju antikoroziona i vatrootporna svojstva čelične površine.

Cementacija se sastoji u obogaćivanju površinskog sloja čelika ugljikom putem difuzionog procesa uz naknadnu termičku obradu kaljenjem i otpuštanjem. Kao osnovni materijal za cementaciju služe ugljični i niskolegirani čelici male čvrstoće i žilavosti, sa sadržajem ugljika do 0,25%. Nakon cementacije i kaljenja postižu se minimalne površinske tvrdoće HR C do 60 kp/mm², dok sredina ostaje mekana i žilava. Dubine cementiranog sloja se najčešće kreću u granicama 0,5–2,0 mm. Na efikasnost cementacije, pored sastava čelika, utiču sredstvo za cementaciju, temperatura cementacije i vrijeme cementacije.

Cementacija se izvodi u čvrstim, tečnim i plinovitim sredstvima. Pri cementaciji u čvrstim sredstvima čelični se dijelovi upakuju u kutije sa cementacionim sredstvima i zajedno s njima zagrijavaju na temperaturu cementacije. Cementacione smjese se sastoje od materija bogatih ugljikom i od tzv. aktivatora. U upotrebi su mnoge recepture čvrstih smjesa za cementaciju, a jedna je od najstarijih i najviše upotrebljavanih mješavina od 60% drvenog uglja i 40% barijum-karbonata. Hemijski proces cementacije odvija se po ovim reakcijama:



Ovim procesom se sama vanjska površina obogaćuje ugljikom koji zatim difuzijom prodire prema unutrašnjosti. Pri cementaciji u tečnim sredstvima stavljuju se dijelovi u rastopljene soli zagrijane na temperaturu cementacije. Soli su obično smjesa alkalijskih hlorida i natrijum-cijanida. Odnos između hlorida i cijanida u smjesi određuje dubinu cementiranog sloja i odnos ugljika i dušika u njemu. Rad sa cijanidima zahtijeva najveću opreznost zbog opasnosti od trovanja. Pri cementaciji u plinskim sredstvima predmeti koji se cementiraju drže se u atmosferi plina koji ima sposobnost naugljičavanja, kao npr. ugljenog monoksida (CO) i metana (CH₄). I u ovom slučaju ugljak se ispočetka koncentriše na samoj površini predmeta, a zatim difuzijom prodire dalje prema unutrašnjosti.

Cementacija se obično vrši u temperaturnom području austenita na ~ 850–930 °C, jer je rastvorljivost ugljika znatno veća u γ-željezu nego u α-željezu. Sa povišenjem temperature raste i sadržaj ugljika u cementiranom sloju i njegova dubina. Normalan sadržaj ugljika u površinskom sloju iznosi ~ 1%. Za manje dubine cementacije, kad se radi s tekućim sredstvima, temperatura iznosi 650–700 °C. Vrijeme držanja na temperaturi cementacije zavisi od sredstava za cementaciju, od potrebne dubine cementiranog sloja i od traženog sadržaja ugljika u njemu. Duže vrijeme cementiranja daje i veću dubinu i veći sadržaj ugljika. U presjeku se računa da brzina cementacije iznosi 0,1 mm/h za čvrsta, 0,2 mm/h za plinovita a 0,4 mm/h za tečna sredstva za cementaciju, pa vremena cementacije iznose praktično između 4 i 6 sati. Ako lokalne površine na konstrukcionim dijelovima ne treba cementirati, one se prevlače zaštitnim sredstvima koja sprečavaju

prodiranje ugljika u površinu. Nakon cementacije komad se termički obraduje kaljenjem i otpuštanjem. Zbog različitog sadržaja ugljika na površini i u sredini cementiranog čelika, a u zavisnosti od traženih osobina površine i jezgre, kaljenje se izvodi na više načina: kaljenje iz uloška, tj. sa temperaturem cementacije direktno bez meduhlađenja, daje u cijelom presjeku grubo zrno, pa se primjenjuje za dijelove koji neće biti izloženi velikim naprezanjima; redovito, komad se pusti da se ohladi pa se onda kali ili sa temperaturem kaljenja koja odgovara sadržaju ugljika u jezgri (pri tom jezgra postaje sitnozrnata, a u površinskom sloju zbog visoke temperature i većeg sadržaja ugljika zrno postaje grubo), ili sa temperaturem koja odgovara (u ovom slučaju visokom) sadržaju ugljika u površinskom sloju (pri tom zrno u površinskom sloju postane sitno, a u jezgri ostane grubo), ili se kali dva puta (dvostruko kaljenje), prvi put sa temperaturem koja odgovara sastavu jezgre a drugi put sa temperaturem koja odgovara sastavu površine; tako se dobiva sitno zrno po cijelom presjeku komada. Danas se iz ekonomskih razloga sve više ide za tim da se razviju čelici za cementaciju koji jednostavnim kaljenjem iz uloška daju proekte jednakog kvaliteta kao obični čelici jednostrukim ili dvostrukim kaljenjem nakon ohlađenja. Da se ponište unutrašnji naponi, nakon kaljenja se dijelovi odmah podvrgavaju otpuštanju, i to ugljični čelici na temperaturama 150–180 °C, niskolegirani čelici na 170–210 °C. Strukturu cementiranog čelika prikazuje slika na prilogu u bakrotisku.

Nitriranje je obogaćivanje površine konstrukcionih čeličnih dijelova dušikom. Ovim postupkom se postiže jako visoke površinske tvrdoće čelika, i do tvrdoće HV = 1100. Čelik za nitriranje mora sadržavati elemente koji sa dušikom tvore tvrde nitride, kao Al, Cr, Ti, V i drugi. Sadržaj ugljika u ovim čelicima kreće se od 0,27 do 0,35%. Prije nitriranja čelik se poboljšava i definitivno mehanički obradi.

Nitriranje se izvodi u struji čistog amonijaka na temperaturi 500–550 °C, pri čemu se amonijak djelomično raspada na dušik i vodik. Dušik se difuzijom prenosi od površine prema unutrašnjosti. Dubina nitriranog sloja obično iznosi do nekoliko desetaka milimetara. Vrijeme nitriranja se kreće od 40 do 90 sati. Nitriranje daje površinu vrlo otpornu prema habanju, vrlo tvrdvu, postojanu do temperatura od 500 °C i otpornu prema koroziji, a da se oblik komada praktično ne promjeni. Mjesta na površini koja nije potrebno nitrirati mogu se zaštiti prevlakama, npr. prevlakom kalaja.

Cijanizacija. Ovim postupkom se obogaćuje površina konstrukcionih dijelova ili alata i ugljikom i dušikom, tj. postiže se kombinirani efekt cementacije i nitriranja. Razlikuje se visokotemperaturna i niskotemperaturna cijanizacija. Visokotemperaturna cijanizacija se izvodi na 840–950 °C. Dubina ugljikom i dušikom obogaćenog sloja ide do 1 mm. Komad se naknadno kali i otpušta. Cijanizaciji na visokim temperaturama podvrgavaju se konstrukcioni dijelovi. Niskotemperaturna cijanizacija izvodi se na temperaturi 540–580 °C i postiže se dubine sloja do 0,1 mm. Ovaj postupak se naročito primjenjuje za alate radi povećanja vijeka trajanja.

Za cijanizaciju služe tečna, plinovita i čvrsta sredstva. Tečna sredstva sastoje se od solnih kupki kojima je osnovni sastojak natrijum-cijanid (NaCN). Plinovita sredstva predstavljaju smjesu 20–30% NH₃ i 70–80% plina za cementaciju. Čvrsta sredstva su mješavina 30–40% kalijum- ili natrijum-ferocijanida i 60–70% drvenog uglja. U cilju postizanja optimalnih površinskih osobina kombinuju se različite temperature i sredstva za cijanizaciju. Vrijeme cijanizacije zavisi od sredstava za cijanizaciju i najkrace je kod tečnih (5–20 min), a najduže kod čvrstih sredstava (do nekoliko sati).

Otvrdnjavanje izlučivanjem. Ovaj postupak termičke obrade, poznat i pod nazivom *termičko taloženje*, bitno se razlikuje od dosada opisanih. Postupak se osniva na tome da su neki elementi (kao Cu, Ti, W, Mo i drugi) u α-željezu manje rastvorljivi na nižim temperaturama nego na višim. Tokom procesa otvrđnjavanja iz prezasićenog čvrstog rastvora jedan dio ovih elemenata izlučuje se iz osnovne mase kao posebna faza, u obliku elemenata ili spajeva, uslijed čega se povećava tvrdoća i više ili manje snižava duktilnost. Otvrdnjavanje putem izlučivanja izvodi se tako da se čelik zagrije na temperature veće rastvorljivosti (500–700 °C) i

onda naglo ohladi, pri čemu se elementi otvrdnjavanja prisilno zadrže otopljeni u α -željezu. Nakon toga se čelik ponovo zagrijava na niže temperature pri kojima dolazi do procesa izlučivanja. Izlučivanjem mogu se u specijalnim čelicima postići čvrstoće na istezanje do 200 kp/mm², pri čemu granica razvlačenja postiže ~ 90% te vrijednosti, a istezanje opadne na nekoliko procenata. Na isti se način ugljik i dušik nakon dužeg vremena mogu na običnoj temperaturi izlučiti iz prezasićenog rastvora u α -željezu i uzrokovati krtost metala. Taj kod čelika nepoželjni proces zove se *starenje*.

Oprema za termičku obradu. Svi postupci termičke obrade vezani su s procesima zagrijavanja i hlađenja, pa se potrebna oprema sastoje od uređaja koji omogućavaju promjenu temperature u komadima koji se termički obraduju. Glavna oprema za termičku obradu jesu peći, solne ili metalne kupke i bazeći za hlađenje. Peći su plinske, naftne ili električne. Prema području temperature za koje se primjenjuju, peći i kupke dijele se na tri grupe: za temperature napaštanja do 700 °C; za žarenje, kaljenje i cementaciju, na 600–1000 °C; za kaljenje brzoreznih čelika na ≤ 1300 °C. Dok peći imaju širi temperaturni raspon, temperaturno područje kupki je uže, određeno sastavom smjese. U tablici 20 navedene su temperature uobičajenih kupki.

Tablica 20
KUPKE ZA TERMIČKU OBRADU

Smjesa	Sastav u tež. %	Temperaturno područje °C
1. Barijum-hlorid	100	1000–1300
2. Kalijum-hlorid Barijum-hlorid	66 34	680–1000
3. Natrijum-karbonat Kalijum-hlorid	50 50	590–810
4. Natrijum-nitrat Kalijum-nitrat	50 50	240–520
5. Olovo	100	350–900
6. Olovo Kalaj	35 65	200–500

Slika 134 prikazuje uobičajenu komornu peć za žarenje manjih komada.

A. Sarajlić

STANDARDIZACIJA I OZNAČAVANJE ČELIKA

Danas svaka država sa značajnjom proizvodnjom čelika ima svoje standarde i propise za čelike. Broj standarda za čelik, kao i zahtjevi koji se njima specificiraju, karakterišu obično nivo proizvodnje i kvalitetu koji se prosječno ostvaruju u dotičnoj zemlji. Standardizacija čelika ima zadatak da se na egzaktan način opišu karakteristike pojedinih vrsta čelika, mehaničke i druge osobine, oblik, dimenzije, način kontrole i sl. Osim toga, standardizacijom se nastoji smanjiti broj vrsta čelika na neophodno potreban minimum u cilju što ekonomičnije proizvodnje i što efikasnije primjene čelika. Standardizacija čelika omogućava najcjelishodniji izbor vrsta čelika s obzirom na namjenu, kao i uskladenost odnosa proizvođača, prerađivača i korisnika čelika. Ipak, danas je još uvijek znatan dio proizvodnje čelika van standarda, pa čak nije dovoljno tehnički definisan i tipiziran. Ovakva situacija je naročito karakteristična za grupu alatnih čelika, gdje za jednu istu ili sličnu namjenu često postoji niz različitih čelika.

Od jugoslovenskih standarda na čelik se odnose standardi grane C (metalurgija i tehnologija prerade metala) i to glavne grupe: C. B: osnovni proizvodi crne metalurgije, C. K: proizvodi crne metalurgije sa specijalnom namjenom, i dijelovi glavnih grupa: C. A: osnovni i opšti standardi za granu metalurgije i tehn-

ologije prerade metala, C. H: izvedeni proizvodi crne i obojene metalurgije, C. J: livački proizvodi crne i obojene metalurgije, i C. T: tehnološki procesi prerade metala. Ukupno je do danas (1967) izdato standarda koji se odnose na čelik: u grupi C. A 25, u grupi C. B 72, u grupi C. K 6, u grupi C. H 15, u grupi C. J 1, u grupi C. T 16.

Sistem označavanja čelika prema JUS. Označavanje čelika po vrstama regulisano je posebnim standardima ili propisima. Oznake i principi označavanja obično su različiti i unutar jedne zemlje s obzirom na vrstu čelika na koju se odnose, a još značajnije razlike postoje u sistemima označavanja različitih zemalja. Zajedničko za sve ove sisteme jest to da se svakom oznakom označava neka ili neke karakteristike čelika, npr. minimalna zatezna čvrstoća, srednji sadržaj ugljika, sadržaj legirajućih elemenata, stanje termičke obrade i sl. No, pored ovih po određenom sistemu složenih oznaka za pojedine vrste čelika, u veoma širokoj upotrebi su i oznake koje ništa ne kažu o čeliku, već predstavljaju rasprostranjene trgovачke oznake koje vuku porijeklo od proizvođača čelika. Trgovачke oznake se sreću naročito za nestandardizovane vrste čelika, dok se za standardizovane vrste čelika upotrebljavaju sve više zvanične oznake date u standardima za te čelike.

Sistem označavanja jugoslovenskih čelika dat je standardom JUS C. B.002. Po ovom sistemu oznake se sastoje od tri dijela, i to od: slovnog simbola »Č«, kojim se označava materijal, tj. čelik, osnovne oznake, koja se sastoje od četiri brojčana simbola kojima se označava vrsta čelika, i dopunske oznake, koja se sastoje od jednog ili dva brojčana simbola kojima se označava stanje čelika. Pri tome osnovna oznaka ima jedno značenje ako se odnosi na čelike sa garantovanim sastavom, a drugo ako se odnosi na čelike sa negarantovanim sastavom.

U čelike sa negarantovanim sastavom spadaju ugljični čelici trgovackog kvaliteta, ugljični čelici sa propisanim mehaničkim osobinama, a bez propisanog hemijskog sastava ili sa propisanim sadržajem sumpora i fosfora, odnosno, za izvjesne svrhe, sa propisanim sadržajem nekog elementa, i ugljični čelici za automate.

Simboli osnovne oznake za ovu grupu imaju ova značenja: simbol na prvom mjestu je 0 i označava pripadnost čelika ovoj grupi. Simbol na drugom mjestu označava grupu minimalne zatezne čvrstoće (nazivne zatezne čvrstoće) i to, kod vruće valjanih čelika u stanju isporuke, odnosno u normalizovanom stanju ako se isporučuju u više stanja, a kod hladnodeformisanih čelika u stanju koje je prethodilo hladnoj deformaciji. Brojčani simboli od 0 do 7 izražavaju grupe nazivnih čvrstoća čelika. Simbol 0 označava čelik bez propisanih mehaničkih osobina (trgovacki kvalitet), a simboli 1 do 7 nazivnu zateznu čvrstoću prema tablici 21.

Tablica 21
GRUPE ČELIKA NOMINALNE ZATEZNE ČVRSTOĆE PREMA JUS C. B.002

Simbol	1	2	3	4	5	6	7
Zatezna čvrstoća, kp/mm ²	do 33	34 do 36	37 do 39	40 do 49	50 do 59	60 do 69	preko 70

Simbol na trećem i četvrtom mjestu predstavlja redni broj čelika i znači: od 0 do 44 ugljične čelike sa negarantovanim čistoćom i čelike trgovackog kvaliteta; od 45 do 89 ugljične čelike sa garantovanim čistoćom ili, za izvjesne svrhe, sa garantovanim sadržajem pojedinih elemenata; brojevi od 90 do 99 su rezervisani.

U grupu čelika sa garantovanim sastavom uvrštavaju se ugljični čelici sa propisanim hemijskim sastavom i legirani čelici. Simboli osnovne oznake za ovu grupu čelika imaju ova značenja: simbol na prvom mjestu za ugljične čelike sa propisanim sastavom je 1, a za legirane čelike označava najuticajniji legirajući element po konvenciji prema tablici 22.

Tablica 22
OZNAKE ZA LEGIRAJUĆE ELEMENTE PREMA JUS C. B.002

Brojčani simbol legirajućeg elementa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ostali
Legirajući element	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V		

Pod najuticajnijim legirajućim elementom po ovom standardu razumijevo se onaj elemenat čiji srednji sadržaj u čeliku, izražen u procentima i pomnožen sa faktorom vrijednosti, prema tablici 23, daje najveći broj; a kao drugi uticajni legirajući elemenat, onaj za koji taj proizvod daje prvi manji broj.

Tablica 23
FAKTORI VRIJEDNOSTI LEGIRAJUĆIH ELEMENATA PREMA JUS C.B0.002

Legirajući element	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al	ostali
Faktor vrijednosti	1	1	4	4	7	14	17	20	30	1	1	30

Ako u višestruko legiranim čelicima više legirajućih elemenata ima isti proizvod procentualnog srednjeg sadržaja i faktora vrijednosti, smatra se najuticajnijim elementom onaj koji po tablici 2 nosi veći broj, a kao drugi uticajni elemenat onaj koji po tablici 2 nosi prvi manji broj.

Simbol na drugom mjestu označava za ugljične čelike sa propisanim sastavom deseterostruku vrijednost maksimalnog процента ugljika zaokruženog na desetine (ako je sadržaj $C \geq 0,9\%$, brojčani simbol na drugom mjestu je uvijek 9), a za legirane čelike, drugi po redu uticajni legirani elemenat sa brojčanim simbolom prema tablici 22, koji se kao drugi po uticaju elemenat određuje na naprijed opisani način. Za jednostruko legirane čelike simbol na drugom mjestu je uvijek 1.

Simbol na trećem i četvrtom mjestu predstavlja redni broj čelika i znači: od 0 do 19 ugljične čelike sa propisanim sastavom i legirane čelike nenamjenjene termičkoj obradi; od 20 do 29 ugljične i legirane čelike za cementaciju; od 30 do 39 ugljične i legirane čelike za poboljšanje; od 40 do 49 ugljične i niskolegirane čelike za alate; od 50 do 59 visokolegirane čelike za alate; od 60 do 69 čelike sa naročitim fizičkim svojstvima; od 70 do 79 čelike hemijski postojane i vatrootporne; od 80 do 89 slobodno; od 90 do 99 ostale čelike.

Dopunska oznaka sastoji se od jednog ili dva brojčana simbola kojima se označava stanje čelika prema tablici 24. Dva brojčana simbola dobivaju se kombinacijom brojčanih simbola navedenih u tablici 24, npr. vučeno i žareno stanje označava se sa 51.

Tablica 24
DOPUNSKE OZNAKE ZA ČELIKE PRÉMA JUS C B0.002

Brojčani simbol stanja	Stanje čelika
.0	bez odredene termičke obrade
.1	žareno
.2	žareno za najbolju obradljivost
.3	normalizovano
.4	poboljšano
.5	hladno deformisano
.9	podešeno po naročitim uputstvima

Dopunska oznaka odnosi se isključivo na poluproizvode (valjani i vučeni čelik) u stanju u kojem se isporučuju; ona se upotrebljava u standardima i drugoj dokumentaciji za porudžbine i isporuku čeličnih poluproizvoda, a ne treba je upotrebljavati kao oznaku materijala na crtežima. U izvjesnim slučajevima, umjesto oznake predvidene ovim standardom, čelici mogu dobiti posebne oznake propisane posebnim jugoslovenskim standardima (npr.: hladno valjane trake, vučena žica itd.). Isto tako, kvalitet izvjesnih čeličnih proizvoda za koje može da se upotrijebi kvalitet polaznog materijala po izboru proizvoda, može se označiti posebnim oznakama propisanim u posebnim jugoslovenskim standardima (npr.: vučana roba, zakovice i sl.).

Sistem označivanja čelika prema DIN. Budući da se u domaćoj literaturi znaju naći i oznake čelika prema njemačkim standardima, u nastavku su navedene osnove sistema označavanja prema standardu DIN 17 006.

Navedeni standard razlikuje četiri grupe gvožđa i čelika: a) nelegirane čelike ($Si \leq 0,5\%$, $Mn \leq 0,8\%$, Al ili $Ti \leq 0,1\%$, $Cu \leq 0,25\%$), b) niskolegirane čelike (ukupni sadržaj legirajućih elemenata $< 5\%$), c) visokolegirane čelike (legirajućih elemenata $> 5\%$), d) gvožđe i ljeveni čelik.

Ad a). Nelegirani konstrukcioni čelici koji se termički ne obrađuju označuju se slovnim simbolom St (Stahl = čelik, u nas se često zamjenjuje simbolom Č) i dvjema brojkama koje znače minimalnu čvrstoću; čelici za poboljšanje označuju se simbolom C (simbolom elementa ugljika) i dvjema brojkama koje znače srednji sadržaj ugljika u stotinkama procenta. Npr.: St 37 je čelik s minimalnom čvrstoćom 37 kp/mm², C 15 čelik sa srednjim sadržajem ugljika 0,15%.

Ad b) i c). Oznaka sadrži najprije dvije brojke koje znače srednji sadržaj ugljika u stotinkama procenta, onda slijede kemski simboli legirajućih elemenata po redu njihove koncentracije i, na kraju, grupa brojki koje označuju srednji sadržaj tih elemenata u čeliku. Da bi te oznake sadržaja bile mali cijeli brojevi, množe se procenti legirajućih sastojaka niskolegiranih čelika ovim faktorima: sadržaj Cr, Co, Mn, Ni, Si i W — sa 4; sadržaj Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ti, V i Zr — sa 10; sadržaj P, S, N i Ce — sa 100. Ako (u visokolegiranim čelicima) sadržaj kojeg legirajućeg elementa prelazi 5%, sadržaji se legirajućih sastojaka ne množe navedenim faktorima i na tu se činjenicu upozorava slovom X stavljениm na početak oznake. Npr.: 24 CrMo 5 4 znači niskolegirani čelik sa 0,24% C, 1,25% Cr i 0,4% Mo; X 10 Cr Ni 18 8 je visokolegirani čelik sa 0,10% C, 18% Cr i 8% Ni.

Ad d). Oznaka svih livenih gvožđa i čelika ima na početku slovo G (Guss = liv), iza kojeg može biti drugo slovo koje označuje o kakvom se livu radi. G bez drugog slova znači visokolegirani čelični liv, GS nelegirani i niskolegirani čelični liv, GG sivo liveno gvožđe, itd. Iza tih slova slijede oznake prema a), b), c). Npr. GS-45 je nelegirani čelični liv s minimalnom čvrstoćom 45 kp/mm², GS-22 CrMo 5 4 niskolegirani čelični liv sa 0,22% C, 1,25% Cr, 0,4% Mo, G-X 15 CrNi 18 8 visokolegirani čelični liv sa 18% Cr i 8% Ni.

Oznaka prema a) ... d) po pravilu je dovoljna u praksi za karakterizaciju različitih čelika. Ona tvori »jezgru« potpunije oznake koja može sadržati još: ispred »jezgre« oznaku načina proizvodnje (B — Bessemer, E — elektročelik, M — Siemens-Martin, T — Thomas, W — kisično-pneumatski) i oznaku specijalnih svojstava (A čelik postojan prema starenju, R umireni čelik, K čelik s malim sadržajem P i S, Q čelik naročito podesan za hladnu deformaciju, itd.), a iza »jezgre« oznaka za opseg garancije svojstava (.1 garantovana granica razvlačenja, .3 garantovana žilavost itd.) i način termičke obrade (A napušten, E cementovan, N normalizovan, itd.). Npr.: MA C 35 je SM-čelik otporan prema starenju sa 0,35% C, RSt 45.1 N je umiren čelik sa min. zateznom čvrstoćom 45 kp/mm², garantovanom granicom razvlačenja i normalizaciono žaren. Namjesto K C i Q C uobičajilo se pisati Ck i Cq, npr. Ck 15 je čelik sa 0,15% C i malim sadržajem P i S.

Kako se vidi, iz oznake prema standardima DIN neposrednije se razabira minimalna čvrstoća, odn. bar približni sastav čelika nego prema standardima JUS. I stoga će se u nastavku uz oznake po JUS navoditi i oznake po DIN, a za neke čelike koji se u ne proizvode i sama oznaka po DIN.

Na istim načelima kao oznake po DIN osnivaju se oznake prema standardima Njemačke Demokratske Republike (SES).

KLASIFIKACIJA ČELIKA PREMA NAMJENI

Prema namjeni čelici se prije svega dijele na dvije velike grupe: konstrukcione čelike i alatne čelike. Konstrukcioni su čelici oni čelici koji se upotrebljavaju za gradnju mašina, čeličnih konstrukcija, brodova itd. Alatni su čelici namijenjeni izradi alata za oblikovanje, razdvajanje i usitnjavanje najrazličitijeg materijala; oni se po pravilu termički obraduju. Podjela na konstrukcione čelike i alatne čelike ne može se provesti sasvim oštros: ima konstrukcijskih čelika koji se upotrebljavaju i za proizvodnju alata, a čelici nekih vrsta koje služe prvenstveno za proizvodnju alata upotrebljavaju se i za gradnju mašina, ili za građevinske konstrukcije, u brodogradnji itd.

Konstrukcioni čelici

Konstrukcioni čelici mogu biti obični, kvalitetni i plemeniti. Obični (masovni) čelici su nelegirani (uglični) čelici koji se proizvode normalnim postupcima masovne proizvodnje, bez posebnih mjera za osiguranje povišenog kvaliteta (što ne znači da način

proizvodnje ne mora osiguravati određena, namjenom uslovljena i standardima propisana svojstva). Kvalitetnim čelicima se izborom sirovina i postupka proizvodnje, posebnim mjerama u proizvodnji i ev. dodatkom legirajućih elemenata osigurava povišeni kvalitet koji ih čini pogodnim za određene namjene. To se odražava i u smanjenom sadržaju najštetnijih pratećih elemenata sumpora i fosfora, te se kvalitetni čelici i karakterizuju time da im je sadržaj S i P (svakog) $< 0,045\%$. Razlikuju se nelegirani (ugljični) i niskolegirani kvalitetni konstrukcijski čelici. Plemeniti konstrukcijski čelici su čelici proizvedeni od izabranih sirovina specijalnim postupcima, često uz dodatak manjih ili većih količina legirajućih elemenata. Pored toga što su karakterizovani većom čistoćom ($P + S < 0,035\%$), proizvodač im garantuje i specijalna svojstva za svaku pojedinu primjenu, npr. otpornost prema oksidaciji i visokoj temperaturi, prema kemijskim učincima, prema habanju, naročitu tvrdoću, elastičnost, pogodnost za nitriranje itd.

Obični (masovni) konstrukcijski čelici. Najvažnija svojstva ovih čelika za njihovu primjenu jesu mehanička svojstva koja se karakterizuju čvrstoćom, izduženjem i granicom razvlačenja. Sadržaj ugljika im je po pravilu između 0,1 i 0,6% C, pri čemu su češći niži sadržaji ugljika. Sadržaj pratećih elemenata kreće se približno u ovim granicama: Si od tragova do 0,45%, Mn od 0,20 do 0,80%, P od 0,01 do 0,10%, S 0,01 do 0,06%, Cu od tragova do 0,20%. S porastom sadržaja ugljika im raste zatezna čvrstoća i granica razvlačenja, a opadaju kontrakcija i izduženje. S porastom ugljika opada i zavarljivost. Nelegirani čelici sa sadržajem ugljika ispod 0,12% većinom su neumirenii, kad im je sadržaj ugljika iznad 0,3%, oni su praktično uvijek umi-

na kraju oznake, npr. Č. 0245 V). U tom su standardu navedena i dva čelika kojima se određena svojstva ne garantuju (Č. 0000 i Č. 0010).

Čelici za noseće konstrukcije obuhvaćeni su standardom JUS C. B0.501. To su vrućevaljani čelici za izradu mostova, konstrukcija u hidrogradnji i gradjevinarstvu, rezervoara, stubova za dalekoveze, okretnica, prijenosnica, kolskih vaga i sl. Čelici Č. 0360, Č. 0460 i Č. 0560 odgovaraju čelicima Č. 0300, Č. 0400 i Č. 0500 iz prethodne grupe, s tim da se ovim čelicima garantuje i granica razvlačenja. Ovi se čelici upotrebljavaju za zakivane konstrukcije, za pritisnute i ostale dijelove zavarenih konstrukcija gdje nema opasnosti od krtog loma. Čelicima Č. 0461, Č. 0462, Č. 0561 i Č. 0562 garantuje se osim toga još žilavost i zavarljivost.

Čelici Č. 0461 i Č. 0462 su normalne vrste za zategnute dijelove zavarenih konstrukcija, Č. 0462 i Č. 0562 su posebne vrste za dijelove konstrukcija gdje postoji opasnost krtog loma (uslijed zaostalih napona od zavarivanja, diskontinuiteta, većih opterećenja i niske temperature, utjecaja hladne deformacije i udarnog naprezanja, utjecaja zareza itd.).

Za ove čelike postavljaju se izvjesna ograničenja u pogledu hemijskog sastava: C max. 0,20%, P i S po 0,06% za čelike s granicom razvlačenja 22 i 25 kp/mm² (Č. 0360, Č. 0460), po 0,05% za čelike s granicom razvlačenja 35 kp/mm² (Č. 0560). Za ove posljednje čelike ograničen je i sadržaj Si (na 0,6%) i sadržaj Mn (na 1,5%).

U standardu JUS C. B0.506 obrađeni su čelici koji se upotrebljavaju za izradu zakovica u čeličnim konstrukcijama. Č. 0246

Tablica 25
UGLJIČNI KONSTRUKCIJSKI ČELICI OBIČNI S GARANTOVANIM MEHANIČKIM OSOBINAMA
(JUS C. B0.500)

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Zatezna čvrstoća kp/mm ²	Izduženje min. %		Savijanje*		Primjene
			δ_5	δ_{10}	a	D	
Č. 0000 Č. 0010	St 33	≤ 50			90° 4 a 2 a		Šipke za ograde, rešetke i druge primjene gdje se ne traže naročite mehaničke osobine
Č. 0210 Č. 0245 Č. 0245 V	St 34	34…42	30	25	180° $\frac{1}{2}$ a		Dijelovi od kojih se traži velika žilavost, npr. vijci, zakovice, poluge, ručke itd.
Č. 0300 Č. 0345 Č. 0345 V	St 37 St 37,2	37…45	25	20	180° a		Sirovi dijelovi koji se ne obrađuju ali moraju imati određene mehaničke osobine
Č. 0400 Č. 0445 Č. 0445 V	St 42	42…50	25	20	180° 2 a		Dijelovi izloženi promjenljivim naprezanjima: osovine, vretena, zupčanici, pogonske motke, ručice i sl.
Č. 0545	St 50	50…60	22	18			Nešto jače napregnuti dijelovi koji već zbog habanja zahtijevaju tvrdi materijal: vretena, osovine, svornjaci, lokomotivske poluge, vagonске osovine, automobilski dijelovi, različiti alati i oruđa kao kliješta, motike i sl.
Č. 0645	St 60	60…70	17	14			Jače napregnuti dijelovi kojima su dimenzije raspoloživim prostorom ograničene: zupčanici, pužnjaci i sl. Dijelovi s većim površinskim pritiskom. Nisu za jača izmjenična naprezanja.
Č. 0745	St 70	70…85	12	10			Dijelovi od kojih se traži veća čvrstoća bez termičke obrade. Nisu za izmjenična naprezanja.

* a kut savijanja, D prečnik pritisnog valjka

reni (kao i svi legirani čelici). Gotovo 100% tih čelika upotrebljava se onako kako su dobiveni poslije tople prerade, tj. bez termičke obrade. Čelici ove podgrupe konstrukcijskih čelika u velikom broju su standardizovani u svijetu i u nas. U nastavku navedeni su neki od njih koji su obuhvaćeni jugoslovenskim standardima.

Obični ugljični konstrukcijski čelici s garantovanim mehaničkim osobinama obuhvaćeni su standardom JUS C. B0.500. U tabl. 25 navedeni su ti čelici, propisane osobine i upotreba. Uz oznake prema JUS C. B0.002 (v. str. 101) navedene su i oznake prema DIN koje im približno odgovaraju. U pomenutom standardu, čije najnovije izdanje treba konsultovati, navedena su garantovana mehanička svojstva (zatezna čvrstoća, izduženje i proba savijanja) i maksimalni sadržaj fosfora i sumpora (prema standardu iz 1960: S 0,06%, P 0,06%, S + P 0,10%, odn. 0,05, 0,05 i 0,09% za čelike kojima se garantuje zavarljivost. Ti su čelici označeni slovom V

(~ St 34.13) je takav čelik za opću upotrebu; Č. 0247 (~ St 34.13) za odgovornije konstrukcije od čelika Č. 0360, Č. 0460, Č. 0461 i Č. 0462; čelik Č. 0248 (~ St 34) namijenjen je kotogradnji, Č. 0446 (~ St 38,13) brodogradnji, od Č. 0447 (~ MR St 44) prave se zakovice za konstrukcije od čelika Č. 0560, Č. 0561, Č. 0562 i u brodogradnji.

Niskougljični konstrukcijski čelik obuhvaćen standardom JUS C. B4.016 dobavlja se uglavnom kao vrućevaljni čelični lim debljine ispod 3 mm, koji služi za plastičnu preradu u hladnom stanju. Č. 0145 su obični crni limovi, Č. 0146 kvalitetniji limovi za presovanje i izvlačenje, Č. 0147 i Č. 0148 limovi za duboko izvlačenje. Ti su čelici prikladni i za prevlačenje prevlakama, te se dodatnom oznakom P₁, P₂, P₃, P₄ ili P₅ označuje stanje površine lima. Od istog čelika proizvodi se također vučeni šipkasti čelik, čelična žica i trake.

Betonski čelik služi za armiranje betona (v. *Armirani beton*). Razlikuje se betonski čelik za obični i betonski čelik za prednapregnuti beton. Prvi se upotrebljava bilo u obliku šipki okruglog presjeka ili šipki s rebrima (v. str. 93), i to od čelika vruće valjanog, hladno vučenog i/ili hladno upredenog. Svi betonski čelici moraju imati određenu sposobnost hladne deformacije. Okrugli

Tablica 26
BETONSKI ČELIK OKRUGLI, VRUĆE VALJANI
(JUS C. K6.020)

Oznaka po JUS	Zatezna čvrstoća kp/mm ²	Granica razvlačenja kp/mm ²		Izdruženje δ ₁₀ , %		Savijanje K*, α = 120° min.
		d ≤ 10 min.	d ≤ 20	d ≤ 18	d > 18	
Č. 0002						
Č. 0002 V		18,5	17			35
Č. 0200						
Č. 0200 V	36	24		20	18	50
Č. 0501						
Č. 0501 V	50	34		20	18	35

* K = 50 d/e, gdje je d prečnik šipke, e poluprečnik krivine. α je ugao savijanja

vruće valjani betonski čelik obuhvaćen je standardom JUS C. K6.020, iz kojeg su u tabl. 26 navedena tri čelika različite čvrstoće. U novije vrijeme za armiranje betona sve se više upotrebljavaju visokovrijedni čelici sa granicom razvlačenja 40, 50, 60 pa 90 kp/mm². Svi oni imaju obavezno rebra na svojoj površini za pojačanje adhezije između betona i čelika. U našoj zemlji proizvodi se odnedavna rebrasti betonski čelik sa minimalnom granicom razvlačenja 40 kp/mm².

Čelici za prednapregnuti beton navode se ovdje radi potpunosti, iako nisu masovni čelici; treba da imaju veliku čvrstoću zatezna i visoku granicu razvlačenja (σ_{0,2}). Bitna je granica elastičnosti, jer ona je praktično identična s granicom razvlačenja te time određuje mjeru prednaprezanja. Čelici za prednapregnuti beton su ili vruće valjani niskolegirani i ev. poboljšani čelici čvrstoće zatezana do 160 kp/mm² ili hladnovučeni i ev. poboljšani čelici zatezne čvrstoće do 200 kp/mm². Granica razvlačenja iznosi ~ 60% zatezne čvrstoće, ali kod poboljšanih ili patentiranih i

hladnovučenih čelika može narasti do na 90%. Za armiranje upotrebljava se u obliku žice jednoličnog ili periodski promjenljivog presjeka, Ø 2,5...8 mm, također u obliku šipaka Ø 8...31 mm.

Kvalitetni i plemeniti konstrukcijski čelici. Ovi su čelici u znatno manjem opsegu standardizovani nego masovni.

Čelici za parne kotlove služe za izradu parnih kotlova i akumulatora pare, za cijevi i otkivke na parnim kotlovima, koji su u pogonu napregnuti različitim pritiscima i temperaturama od 100 do 650 °C. Ti čelici treba da budu dobro zavarljivi i dovoljno žilavi i na višim temperaturama, da ne bi nastali krti lomovi s posljedicama koje mogu biti katastrofalne. Oni mogu biti nelegirani i legirani. Kvalitetni su nelegirani čelični proizvod tzv. kotlovnih limova, upotrebljavani za kotlovna postrojenja, posude pod pritiskom, široke cijevi pod pritiskom, i sl. Ovim limovima garantuju se vrijednosti granice razvlačenja u topлом stanju i udarne žilavosti, koje se određuju ponaosob za svaku vâljalu partiju. Osim toga može biti garantovana i otpornost prema starenju. Od naših standarda na kotlovine limove odnosi se JUS C. B4.014, koji obuhvaća čelike Č. 1200...Č. 1208. Čelici Č. 1200 i Č. 1201 su normalni kotlovnici limovi sa max. 0,17 odn. 0,23% C i min. 0,30% Mn. Čelici Č. 1202 i Č. 1203 imaju max. 0,16% C i min. 0,40% Mn; Č. 1203 je otporan prema starenju. Čelici Č. 1204, Č. 1205, Č. 1206 i Č. 1207 su kvalitetni kotlovnici limovi; prva dva imaju max. 0,20% C i min. 0,50% Mn, a druga dva max. 0,22% C i min. 0,55% Mn; čelici Č. 1205 i Č. 1207 otporni su prema starenju. Čelik Č. 1208 služi za lokomotivske kotlove, ima max. 0,15% C i min. 0,80% Mn, otporan je prema starenju. Kad je potrebna veća čvrstoća na povišenoj temperaturi i otpornost prema oksidaciji (stvaranju kovarine) iznad 550 °C, upotrebljavaju se za parne kotlove vatrootporni niskolegirani čelici, npr. Č. 7100 (DIN 15 Mo 3), Č. 7400 (DIN 13 CrMo 4 4), Č. 7401 (DIN 10 CrMo 9 10). Od takvih čelika, koji imaju granicu razvlačenja min. 36 kp/mm² na 350 °C, prave se i cijevi za pojenje kotlova pod visokim pritiskom. Za najviše temperature (600 °C i više) upotrebljavaju se plemeniti visokolegirani čelici čvrsti na tim temperaturama (v. str. 108).

Čelici za cementaciju, ugljični i niskolegirani, obrađeni su u standardu JUS C. B9.020. U tabl. 27 navedeni su, primjera radi, sastav, mehanička svojstva i primjena nekih tipičnih čelika za cementaciju.

Čelici za poboljšanje su ugljični ili niskolegirani čelici sa sadržajem ugljika preko 0,25% i sadržajem legirajućih elemenata:

Tablica 27
ČELIK ZA CEMENTACIJU (JUS C. B 9.020)

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Kemijski sastav, %	Mehanička svojstva jezgre nakon kajenja			Primjena
			σ _v kp/mm ²	σ _m kp/mm ²	δ ₅ %	
Č. 1120	C 10	C 0,06...0,12, Mn 0,25...0,50	≥ 25	42...52	≥ 19	Mali mašinski dijelovi, npr. za pisaće mašine
Č. 1220	C 15	C 0,12...0,18, Mn kao Č. 1120	≥ 30	50...65	≥ 16	Ručice, poluge, rukavci, svornjaci, tuljci, zglobovi i sl.
Č. 1121	Ck 10	C, Mn kao Č. 1120	≥ 25	42...52	≥ 19	Dijelovi kao naprijed, ali s većim zahtjevima u pogledu homogenosti, čistoće i kvaliteta površine; npr. vretena, osovinice klipa, bregaste osovine i sl.
Č. 1221	Ck 15	C, Mn kao Č. 1220	≥ 30	50...65	≥ 16	
Č. 4120	15 Cr 3	C 0,12...0,18, Mn 0,40...0,60, Cr 0,50...0,80	≥ 40	60...85	≥ 13	Bregaste osovine, valjci, svornjaci, osovinice klipa, vretena, mjerila itd.
Č. 4320	16 MnCr 5	C 0,14...0,19, Mn 1,0...1,3 Cr 0,80...1,1	≥ 60	80...110	≥ 10	Mali zupčanici, vratila i osovine mjenjačkih kutija i sl.
Č. 4321	20 MnCr 5	C 0,17...0,22, Mn 1,1...1,4, Cr 1,0...1,3	≥ 70	100...130	≥ 8	Srednji zupčanici i osovine vratila mjenjačkih kutija i sl.
Č. 4720	15 CrMo 5	C 0,13...0,17, Mn 0,80...1,1, Cr 1,0...1,3, Mo 0,2...0,3	≥ 60	85...110	≥ 10	Bregaste osovine, zupčanici mjenjačkih kutija, dijelovi kormila, kardanski zglobovi.
Č. 4721	20 CrMo 5	C 0,18...0,23, Mn 0,90...1,2, Cr 1,1...1,4, Mo 0,20...0,30	≥ 75	110...145	≥ 7	Radilice, zupčanici mjenjačkih kutija i dr. dijelovi izloženi velikom habanju.
Č. 5420	15 CrNi 6	C 0,12...0,17, Mn 0,40...0,60, Cr 1,4...1,7, Ni 1,4...1,7	≥ 65	90...120	≥ 9	Jako napregnuti zupčanici manjih dimenzija
Č. 5421	18 CrNi 8	C 0,15...0,20, Mn 0,40...0,60, Cr 1,8...2,1, Ni 1,8...2,1	≥ 80	120...145	≥ 7	Tanjurasti zupčanici, zupčanici diferencijala, jako opterećeni zupčanici vratila većih dimenzija

Sadržaj Si u svim ovim čelicima 0,15...0,35%, P i S u Č. 1120 i Č. 1220 svaki ≤ 0,045%, u ostalim ≤ 0,035%.

Tablica 28
ČELIK ZA POBOLJŠANJE (JUS C. B9.021)

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Kemijski sastav* %	Mehanička svojstva u poboljšanom stanju, Ø 16...40 mm			Primjena
			σ_v kp/mm ²	σ_m kp/mm ²	δ_s %	
Č. 1330	C 22	C 0,18...0,25, Mn 0,30...0,60	30	50...60	22	
Č. 1331	Ck 22					
Č. 1430	C 35	C 0,32...0,40, Mn 0,40...0,70	37	60...72	18	
Č. 1431	Ck 35					
Č. 1530	C 45	C 0,42...0,50, Mn 0,50...0,80	40	65...80	16	Sastavni dijelovi vozila i bicikla kao: osovine, bendaže, klipnjače, radilice i dr. mašinski dijelovi opće mašinogradnje
Č. 1531	Ck 45					
Č. 1730	C 60	C 0,57...0,65, Mn 0,50...0,80	49	75...90	14	
Č. 1731	Ck 60					
Č. 3130	40 Mn 4	C 0,36...0,44, Mn 0,80...1,1, Si 0,25...0,50,	55	80...95	14	Za male i srednje napregnute dijelove vozila, motora i mašina
Č. 3131	30 Mn 5	C 0,27...0,34, Mn 1,2...1,8				
Č. 3230	37 MnSi 5	C 0,33...0,41, Mn 1,1...1,4, Si 1,1...1,4	65	90...105	12	
Č. 3830	42 MnV 7	C 0,38...0,45, Mn 1,6...1,9, V 0,07...0,12	80	100...120	11	Za dinamički napregnute dijelove i dijelove velikih promjera
Č. 4130	34 Cr 4	C 0,30...0,37, Mn 0,50...0,60, Cr 0,90...1,2		kao Č. 3230		
Č. 4131	41 Cr 4	C 0,38...0,44, Mn, Cr kao Č. 4130				
Č. 4830	50 CrV 4	C 0,47...0,55, Mn 0,80...1,1, Cr 0,90...1,2, V 0,07...0,12	90	110...130	10	Za jako napregnute dijelove vozila, mašina i motora
Č. 4730	25 CrMo 4	C 0,22...0,29, Mn, Cr kao Č. 4131, Mo 0,15...0,25		kao Č. 3131		
Č. 4731	34 CrMo 4	C 0,30...0,37, Mn, Cr, Mo kao Č. 4730		kao Č. 3230		
Č. 4732	42 CrMo 4	C 0,38...0,45, Mn, Cr, Mo kao Č. 4730		kao Č. 3830		Za jako napregnute dijelove mašina, motora i vozila, naročito na višoj temperaturi
Č. 4733	50 CrMo 4	C 0,46...0,54, Mn, Cr, Mo kao Č. 4730		kao Č. 4830		
Č. 4734	30 CrMoV 9	C 0,26...0,34, Mn 0,40...0,70, Cr 2,3...2,7, Mo 0,15...0,25, V 0,1...0,2	105	125...145	9	
Č. 5430	36 CrNiMo 4	C 0,32...0,40, Mn 0,50...0,80, Cri Ni po 0,90...1,2, Mo 0,15...0,25		kao Č. 3830		
Č. 5431	34 CrNiMo 6	C 0,30...0,38, Mn 0,40...0,70, Cr i Ni po 1,4...1,7, Mo 0,15...0,25		kao Č. 4830		Za statički i dinamički jako napregnute dijelove motora
Č. 5432	30 CrNiMo 8	C 0,26...0,34, Mn 0,30...0,60, Cr i Ni po 1,8...2,1, Mo 0,25...0,35		kao Č. 4734		

*P i S u ugljičnim čelicima sa rednim brojem 39 (svaki) $\leq 0,04$, sa rednim brojem 31 i u legiranim $\leq 0,035$. Si, gdje nije drukčije navedeno, $0,15...0,35\%$.

Cr do 2,5%, Ni do 2,0%, Mn do 2%, uz manje dodatke Mo i ili V. Višelegirani čelici po pravilu su bolje prokaljivi i uz jednaku čvrstoću žilaviji nego niželegirani. S porastom prečnika smanjuje se djelstvo poboljšanja zbog manje brzine hladjenja. Npr. čelik Č. 4731 ima pri prečniku ~ 16 mm zateznu čvrstoću $100\cdots 200$ i granicu razvlačenja min. 80 kp/mm², a pri prečniku $100\cdots 120$ mm čvrstoću $70\cdots 85$ i granicu razvlačenja min. 45 kp/mm². U tabl. 28 navedeni su neki tipični čelici za poboljšanje iz standarda JUS C. B9.021.

Čelici za brodogradnju obradeni su u ovoj enciklopediji u članku Brod (TE 2, str. 260).

Čelici za žicu (podrazumijeva se vučena žica promjera manjeg od 5 mm) kvalitetni su ugljični čelici, tj. ugljični čelici s manjim sadržajem fosfora i sumpora. Prema primjeni žice određuje se hemijski sastav čelika i tehnološki postupak proizvodnje, da bi se postigle određene mehaničke osobine u stanju isporuke. Zatezna čvrstoća žice može, prema sastavu čelika i načinu proizvodnje, varirati u veoma širokim granicama od 32 do 360 kp/mm². Velike čvrstoće uz istovremeno dovoljno istezanje postižu se vučenjem u kombinaciji s patentiranjem. Prema sadržaju sumpora i fosfora čelici za žicu mogu se razvrstati u četiri grupe: I grupa sa maksimalnim sadržajem S i P po 0,025%, II grupa sa S i P max. po 0,035%, S + P max. 0,06%; III grupa sa S i P max. po 0,05%; IV grupa sa S $\leq 0,06\%$, P $\leq 0,08\%$. Žice od čelika I i II grupe moraju kvalitetom zadovoljiti najstrože zahtjeve, služe za izradu

čeličnih užadi, za armaturu prednapregnutog betona, u tekstilnim strojevima, za klavirske žice itd., žice III grupe imaju raznovrsnu primjenu u mašinstvu, a žice IV grupe tamo gdje se ne postavljaju strogi zahtjevi. Čelici prve tri grupe proizvode se u SM- i elektropećima, čelici IV grupe obično samo u Thomasovom konverteru.

*Niskolegirani naročito dobro zavarljivi kvalitetni čelici povisene granice razvlačenja i čvrstoće upotrebljavaju se kao čelici povisene čvrstoće za zavarene čelične konstrukcije, ali i za druge primjene u kojima su važna navedena njihova svojstva, npr. u gradnji aparature u kemijskoj i procesnoj industriji, u nuklearnoj tehniči, za kuglaste zavarene rezervoare, za vozila-cisterne velikog kapaciteta itd. Za prvi takav čelik bila se udomaćila i izvan Njemačke oznaka »St 52« (prema DIN). To je varijanta čelika DIN St 50 (po JUS Č. 0545, v. str. 103) koja sadrži više mangana(max. 1,50%) i manje ugljika (0,20%), a uslijed posebnog načina lijevanja (uz dodatak aluminijuma) ima strukturu sitnijeg zrna i gotovo se uvijek normalizuje radi postignuća optimalnih svojstava, naročito povisene granice razvlačenja (≥ 36 kp/mm²) i bolje zavarljivosti. Dalji razvoj tih čelika doveo je do tzv. *sinozrnatih čelika* u kojima se malim dodacima legirajućih elemenata i izlučivanjem nitrida i oksida aluminijuma, titana, nioba i vanadijuma smanjuje veličina zrna i ubrzavaju fazni preobražaji tako da se povisuje granica razvlačenja (do ~ 50 kp/mm² na 20 °C) i poboljšava zavarljivost. Kao pogodne pokazale su se ove kombinacije legirajućih elemenata: Mn-Ni-V, Mn-V-N, Mn-Ni-Cu-V.*

U procesnoj industriji se mnogo upotrebljavaju također nelegirani i visokolegirani čelici. Za prirubnice cijevnih vodova pod visokim pritiskom, za vijke, vretena i neke otkivke upotrebljavaju se čelici slični čelicima za poboljšanje Č. 1330 i Č. 1430, s time da im je sadržaj mangana nešto povišen (do 0,9%) i što im sadržaj bakra i kroma može da iznosi do 0,5%. Moraju biti nepropusni za plinove, tj. bez pora, plinskih mjejhura i drugih diskontinuiteta koji smanjuju gustinu. Za plemenite čelike upotrebljavane u procesnoj industriji v. str. 107 i 109.

Celici za velike otkivke slični su po svome sastavu niskolegiranim čelicima za poboljšanje, sa jednim ili sa više legirajućih elemenata Mn, Cr, Ni i Mo (obično $\sim 1,5 \dots 2,5\%$ svakoga). Osobine koje se propisuju zavise od prečnika otkivka i od pravca uzimanja uzorka (uzdužno, poprečno i tangencijalno).

Specijalni konstrukcijski čelici. U ovu grupu čelika može se svrstati velik broj čelika za specijalne namjene. To su najčešće visokolegirani čelici, ali ima među njima i niskolegiranih i ugljičnih. Ti čelici velikom većinom nisu obuhvaćeni jugoslovenskim standardima, a i u drugim zemljama su malo standardizovani.

U nastavku su navedene neke podgrupe tih čelika, većinom takvih koji se proizvode i u našoj zemlji.

Celici za ventile. Ventili motora s unutrašnjim sagorijevanjem, naročito izlazni ventili modernih motora velikog djejstva, vrlo su jako napregnuti. Od njih se zahtijeva čvrstoća u vrućem stanju, na sjedištima otpornost prema habanju u vrućem stanju, otpornost prema eroziji i prema koroziji plinovima sagorijevanja. Ti su čelici mahom austenitni čelici. Od čelika domaće proizvodnje upotrebljava se za malo napregnute ulazne ventile motora čelik Č. 2371 (65Si7), za jako napregnute ulazne ventile i manje napregnute izlazne ventile čelik Č. 4270 ($\sim X45$ CrSi 9), za jako napregnute izlazne ventile čelik Č. 4771 (X35CrMo 17) a za najviše napregnute izlazne ventile čelik Č. 4575 (X50NiCrW 1313). Za najviše napregnute ventile služe također čelici X 80 CrNiSi 20 i X 40 MnCr 18. Čelik X 40 MnCr 18 upotrebljava se za prstene izlaznih ventila, čelik X 210 Cr 12 za ventilske prstene svake vrste.

Celici za opruge su čelici visoke granice elastičnosti i trajne čvrstoće. U praksi se namjesto granice elastičnosti uzima kao veličina karakteristična za kvalitet tih čelika granica razvlačenja,

Čelici za nitriranje (v. str. 100) moraju sadržati legirajuće elemente koji tvore nitride, npr. krom, molibden i, naročito, aluminijum. Najbolje djejstvo dobiva se u poboljšanom stanju. Takav je čelik domaće proizvodnje npr. Č. 4739 (34 CrAlMo 5), koji ima (poboljšan) zateznu čvrstoću $80 \dots 100$ kp/mm², granicu razvlačenja 60 kp/mm², istezanje ($l_0 = 5d_0$) min. 14%, a upotrebljava se za dijelove motora kao što su osovine, radilice i sl.

Celici za kotrljajuće ležajeve treba da u zakaljenom stanju bude otporan pod visokim lokalnim i naizmjeničnim naprezanjima zatezanja, pritisaka, smicanja i habanja kojima su izloženi dijelovi kugličnih, valjčanih i iglenih ležajeva. Pri tom mogu da se nepovoljno ispoljavaju i male heterogenosti, kao nejednoličnosti strukture i uključci, koje u čeliku za druge primjene uopće ne smetaju. Čelik za kotrljajuće ležajeve treba stoga da se isporučuje sa što jednoličnijim strukturnim i mehaničkim osobinama. Tvrdoča HB mora u stanju isporuke biti između 170 i 207 kp/mm², tvrdoča HR C gotovih proizvoda treba da je između 56 i 66, prema dijelu ležaja o kojem je riječ. Takvi su čelici npr. Č. 4140 (DIN 90 Cr 3), koji se upotrebljava za kuglice i valjčice i za obruče debljine do 17 mm, Č. 4146 [DIN 100 Cr 6 (W 3)] za kuglice i valjčice svih dimenzija i obruče do 30 mm \varnothing , Č. 4340 (100 CrMn 6) za obruče kotrljajućih ležajeva debljine preko 30 mm.

Celici otporni prema habanju jesu manganski čelici kojima je ponekad dodan krom ili nikal. Tzv. tvrdi čelik (po pronalazaču zvan i Hadfieldov čelik), prema JUS Č. 3160 (DIN X 120 Mn 12), koji dolazi i s dodatkom kroma do 2% — npr. čelik za livenje ČL. 3460 (Č. 3160 plus 0,8% Cr) — predstavlja čelik koji zakljen sa temperature > 1100 °C ima austenitnu strukturu. Austenitna se struktura tog čelika pri deformaciji (pod pritiskom) pretvara u martenzitnu, stoga je on otporan prema habanju koje materijal deforme, mada nije naročito tvrd (tvrdoča HB ≈ 250 kp/mm²), tj. nije toliko otporan prema habanju koje zadire u površinu materijala. Budući da je taj čelik osim toga vrlo žilav, on se mnogo upotrebljava za predmete koji su podvrgnuti i habanju i naprezanju udarom ili savijanjem, npr. za dijelove drobilica i transportnih uređaja, za tračnice kako izložene habanju, jezgre šupljih svrdala itd. Drugi prema habanju otporni manganski čelici jesu npr. i ČL. 5360 (liv) sa 0,8% C, 12% Mn i 4% Ni i Č. 3134

T a b l i c a 29
ČELIK ZA OPRUGE (JUS C. B0.551)

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Kemijski sastav, %	Mehaničke osobine (kaljen i napušten)			Primjena
			σ_v kp/mm ²	σ_m kp/mm ²	δ_s %	
Č. 2130	38 Si 6	C 0,35…0,42, Mn 0,50…0,80, P i S $\leq 0,05$	≥ 105	120…140	≥ 6	Za prstenaste elastične podloške i podložne pločice za osiguranje, tanjuraste opruge i opruge kultivatora
Č. 2131	46 Si 7	C 0,42…0,50				Za pužaste opruge za vagone, lisnate opruge i zavojne opruge za vagone
Č. 2132	51 Si 7	C 0,48…0,55 Mn 0,50…0,80, Si 1,5…1,8 P i S $\leq 0,05$				
Č. 2133	55 Si 7	C 0,52…0,60, Mn 0,70…1,0, Si 1,5…1,8 P i S $\leq 0,05$	≥ 110	130…150	≥ 6	
Č. 2330	60 SiMn 5	C 0,55…0,65, Mn 0,90…1,2, Si 1,3…1,6 P i S $\leq 0,05$				Za lisnate opruge za cestovna vozila, tanje zavojne opruge za vagone, podložne pločice, tanjuraste opruge
Č. 4230	67 SiCr 5	C 0,62…0,72, Mn 0,40…0,60, Cr 0,40…0,60 Si 1,2…1,4 P i S $\leq 0,035$	≥ 135	150…170	≥ 5	Za zavojne opruge naročito napregnute na udar, torzionate opruge, opruge ventila
Č. 4830	50 CrV 4	C 0,47…0,55, Mn 0,80…1,1, Cr 0,90…1,2, Si 0,15…0,35, P i S $\leq 0,035$, V 0,07…0,12	≥ 120	135…170	≥ 6	Za najjače napregnute opruge cestovnih vozila, zavojne opruge, torzionate opruge

ali različita upotrebljivost čelika gotovo iste granice razvlačenja može se objasniti samo time da im je granica elastičnosti različita. Prema primjeni, sastavu i načinu proizvodnje, opruge se upotrebljavaju prirodno tvrde, vučene, patentirane ili kaljene i napuštenе. U tabl. 29 navedeni su neki čelici za opruge koji su obuhvaćeni standardom JUS C. B0.551. Opruge se inače prave također od nerđajućih čelika i čelika s postojanom čvrstoćom na visokoj temperaturi (v. str. 107 i 109).

(DIN 46 Mn 7) odn. ČL. 3134 (liv). Otporni su prema habanju i čelici s velikim sadržajem ugljika i kroma, kao Č. 4150 (DIN X 210 Cr 11), čelik sa silicijumom i mangansom, npr. DIN 65 SiMn 5 (za tvrdi sloj dvoslojnih tračnica), krom-molibdenski čelici sa 0,75…7% Cr i 0,5…0,85% Mo (za članke gusjenica, za podstave mlinova, za kućišta i druge dijelove drobilica, za kućišta i rotore pumpi za muljeve), visokolegirani krom-nikalni čelici, npr. DIN X 70 CrNi 25 12 (čelik otporan prema habanju

i čvrst na visokoj temperaturi, npr. za cijevi u kreking-uredajima), čelik s povišenim sadržajem silicijuma, npr. Č. 2130 (DIN 38 Si 6, za lemeše plugova).

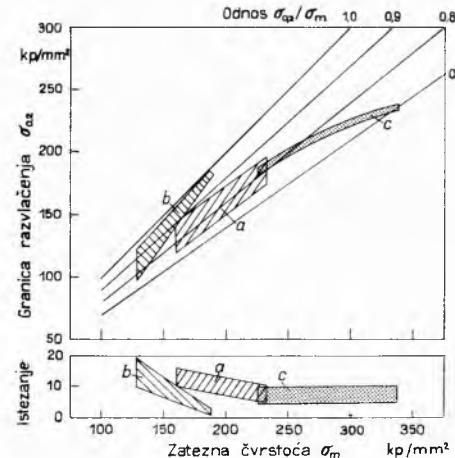
Magnetni čelici imaju specijalna magnetna svojstva. Razlikuju se magnetno meki čelici s velikom maksimalnom indukcijom i malom koercitivnom silom (uskom petljom histereze) i magnetno tvrdi čelici (čelici za stalne magnete) sa velikom koercitivnom silom i velikom zaostalom indukcijom (širokom petljom histereze). Magnetno meki čelici dijele se u dvije grupe: za tehniku jake struje i za tehniku slabe struje. *Magnetni čelici za tehniku jake struje* moraju biti razmjerno jeftini pa su stoga nelegirani ili niskolegirani. Limovi za dinamo-mašine i transformatore legiraju se sa silicijumom, mada se time ponešto proširuje petlja histereze, jer bi inače gubici vrtložnim strujama bili preveliki. Sadržaj ugljika u njima ne smije prelaziti 0,1%. Za jako napregnute polne točkove i polove, vretena i induktorska tijela upotrebljavaju se kovani čelici nisko legirani s niklom, kromom i molibdenom, npr. 28 NiCrMo 4 i 36 NiCrMo 3. *Čelici za tehniku slabe struje* moraju imati veliki početni permeabilitet, u drugim slučajevima nepromjenljiv permeabilitet; cijena nije kritična. Ti »čelici« su većinom, u stvari, legure nikla i/ili kobalta sa sadržajem željeza ispod 50%, npr. μ -metal (Hyperm 766, Legura 1040), legura velikog početnog permeabiljeta, sadrži 72 ... 75% Ni, 5 ... 14% Cu, 2,0 ili 3,0 Cr odn. Mo, ostatak željezo; legure postojanog permeabiljeta jesu npr. Permivar sa 30% Fe, 45% Ni i 25% Co, nadalje legure sa 40 ... 65% Fe i 60 ... 35% Ni, koje se lako hladno očvršćavaju i nepotpuno rekristalizuju.

Magnetno tvrdi čelici (*čelici za stalne magnete*) su ili martenzitni, niskolegirani s kromom i višelegirani s kobaltom, kromom i nešto volframa ili molibdena, ili su niskougljični visokolegirani s aluminijumom i niklom (Alni) ili s aluminijumom, niklom i kobaltom (Alnico). Prvi se mogu obradivati plastičnom deformacijom i skidanjem strugotine, a otvrdnjavati kaljenjem, drugi se mogu oblikovati samo lijevanjem, obradivati samo brušenjem, a otvrdnjavati samo izlučivanjem.

Čelici koji se ne magnetizuju su čelici koji pod uticajem magnetnog polja ostaju nemagneti, a i pri hladnoj deformaciji samo u maloj mjeri stječu sposobnost da budu magnetizovani. To su neki manganski čelici, kao Č. 3160 (DIN X 120 Mn 12) i DIN X 35 Mn 18, i čelici legirani s manganim, kromom i/ili niklom, npr. DIN 40 MnCr 18, 55 MnNiCr 14, X 20 CrNiMn 12 9, X 12 CrNi 18 8 (Č. 4571), X 8 CrNi 12 12, X 12 MnCr 18 10. Magnetska permeabilnost tih čelika ne smije biti veća od 1,27 ... 1,38 H/m, prema vrsti čelika, specifični električni otpor je između 0,65 i 0,8 Ω mm²/m. Takvi se čelici upotrebljavaju za bandažne žice, induktorske kape, razvodne ploče, kućišta (kutije) za kompase i časovnike; naveliko se upotrebljavaju za čamce ili brodove minočistača.

Automatni čelici su čelici koji obrađeni uz skidanje strugotine daju kratku strugotinu i gładu površinu nego drugi čelici jednake čvrstoće, te se mogu obradivati na alatnim mašinama većom brzinom. Oni se tako zovu jer su naročito pogodni za serijsku proizvodnju dijelova velike tačnosti dimenzija na alatkama automativa. Navedena se svojstva postižu visokim sadržajem sumpora (do 0,30%) i fosfora (do 0,10%), u novije vrijeme i dodatkom olova (0,2 ... 0,5%). Kromni i krom-nikalni čelici otporni prema koroziji stječu pomenuta svojstva dodatkom molibden- ili cirkonijum-sulfida, a da im otpornost prema koroziji time bitno ne opada. Čelici te vrste obuhvaćeni su standardom JUS C. B0.505. Čelik Č. 1190 (DIN 10 S 20, dolazi i sa 0,15 ... 0,30% Pb: 9 SPb 23), meki čelik za obradu najvećim brzinama na automativa, služi za izradu vijaka (zavrtanja), matica (navrtaka), dijelova bicikla i drugih mašinskih dijelova kojih mehaničke osobine nisu kritične. Taj čelik, kao i tvrdi čelici Č. 1290 (DIN 15 S 20) i naročito Č. 3190 (sa max. 0,20% C, 0,20 ... 0,25% S, 1,10 ... 1,40% Mn), pogodan je za cementaciju. Č. 1290 i Č. 3190 upotrebljavaju se za izradu dijelova tankih zidova koji se podvrgavaju cementaciji, npr. dijelova motornih vozila, šivačih mašina, aparata i sl. Čelici s većim sadržajem ugljika, kao Č. 1490 (DIN 35 S 20) i Č. 1590 (DIN 45 S 20) prikladni su za poboljšanje te se upotrebljavaju za izradu dijelova izloženih velikim naprezanjima i površinskom pritisku.

Specijalni čelici visoke čvrstoće (> 120 kp/mm²) i granice razvlačenja (> 100 kp/mm²) razvili su se naročito uslijed potreba gradnje letjelica i raket. Većinom su to visokolegirani čelici otporni prema rđanju, o kojima će biti govora malo kasnije. Za veće čvrstoće ali manje granice razvlačenja upotrebljavaju se niskolegirani zakaljeni čelici i čelici jednaki legiranim alatnim čelicima za rad u vrućem stanju, npr. Č. 6751 (DIN 38 CrMoV 5 1), a za najveće čvrstoće niskolegirani čelici termički obradeni postupkom »ausforming« (v. sl. 135 str. 99). Sl. 135 prikazuje grafički područja istezanja i granice razvlačenja u koja



Sl. 135. Mehaničke osobine specijalnih čelika visoke čvrstoće i granice razvlačenja. a Niskolegirani zakaljeni čelici i legirani alatni čelici za rad u vrućem stanju, b visokolegirani čelici otporni prema koroziji, c niskolegirani čelici obradeni postupkom »ausforming«

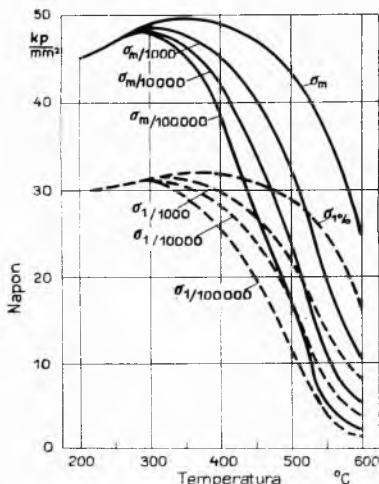
padaju navedeni čelici. Osim za leteće mašine vrlo velike brzine i za letjelice i raketu, ti se čelici upotrebljavaju također u kemijskoj industriji gdje su potrebne velike čvrstoće (npr. za reaktore pod visokim pritiskom). Temperaturno područje njihove upotrebe seže od -80 do 500 °C. Za više temperature potrebeni su čelici postojane čvrstoće na visokim temperaturama (v. dalje).

Čelici postojane žilavosti na niskim temperaturama. S opadanjem temperature čelicima općenito raste čvrstoća i granica razvlačenja, ali im opada kontrakcija i istezanje pri lomu, a tako i udarna žilavost, tj. povećava im se sklonost ka krtom lomu. Za primjene u kojima je potrebna žilavost i na niskim temperaturama — npr. uređaje za dobivanje, skladištenje i transport tečnih plinova — treba upotrebljavati čelike koji i na niskim temperaturama imaju dovoljnu žilavost. Kako je već naprijed spomenuto, čelici umireni dovoljnim količinama aluminijuma imaju sitno zrno te su zato osobito pogodni za zavarivanje; ti su čelici osim toga otporni prema starenju (v. str. 101), a i žilavost na niskim temperaturama im je povećana. Pogodnim daljim metalurgijskim mjerama (kao termičkom obradom) razvili su se iz tih čelika nelegirani čelici velike žilavosti na niskim temperaturama, DIN TTSt 35 N i V, TTSt 41 N i V, TTSt 45 N i V (TT znači »tefne Temperature« — niske temperature). Slično djelstvo kao aluminijum imaju takoder V, Nb i Ti; i mali dodaci Mn, Cr, Mo i V djeluju povoljno u vezi s pogodnom termičkom obradom.

Reservoari za tečne plinove pod pritiskom mogu se graditi od takvih nelegiranih plemenitih čelika normalizovanih do temperature -50 °C, a poboljšanih, do -80 °C; od -100 °C do najnižih temperatura preporučuju se visokolegirani austenitni Cr-Ni-čelici, a do ~ -200 °C upotrebljivi su visokolegirani feritni nikalni čelici. Za temperaturno područje između -80 i -100 °C upotrebljavaju se poboljšani niskolegirani čelici.

Čelici postojane čvrstoće na višim i visokim temperaturama. Iznad temperature 300 ... 400 °C (zavisno od sastava) čvrstoća čelika postaje zavisna od vremena, tj. uslijed strukturnih promjena koje nastaju u čeliku pod uticajem temperature, napon dovoljan da dovede do loma trajno napregnutog uzorka čelika postaje s vremenom sve manji, i to s tim brže što je trajno naprezanje veće i temperatura viša. Kako žilavost čelika raste s povišenjem tempe-

rature, može uslijed djelovanja vremena i temperature na trajno napregnuti čelik doći do njegova loma i prije nego je postignuta granica razvlačenja (koja, uostalom, na višoj temperaturi i nije oštra). Stoga kao karakteristika za ponašanje čelika na povišenoj



Sl. 136. Primjer temperaturne zavisnosti mehaničkih osobina jednog čelika postojane čvrstoće na višim temperaturama

temperaturi ne može služiti ni zatezna čvrstoća isporučenog čelika ni granica razvlačenja, nego se to ponašanje karakterizuje na ponom koji nakon određenog dugog vremena t na određenoj temperaturi dovodi do loma (*trajnom čvrstoćom* $\sigma_{m,t}$) odnosno do plastičnog rastezanja od 1% (*trajnom granicom puzanja za 1%*, $\sigma_{1,t}$). Sl. 136 prikazuje, primjera radi, zavisnost tih veličina od temperature i vremena trajnog naprezanja za čelik St 13 CrMo 44 (Č. 7400). Kako se vidi, u području između 200 i 300 ... 350 °C čvrstoća uslijed izlučivanja malo poraste, a iznad toga više ili manje naglo opada.

Obično se navode vrijednosti za trajna naprezanja od 100 000 sati ($\sigma_{m/100\ 000}$ odn. $\sigma_{1/100\ 000}$), dobivene ekstrapolacijom iz rezultata pokusa vršenih kroz najmanje 10 000 sati.

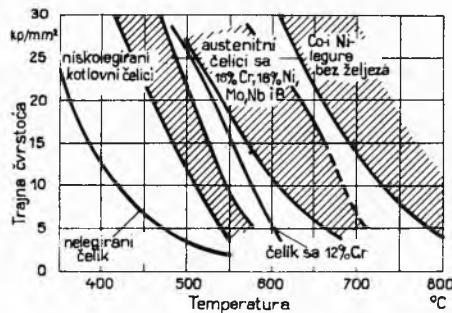
Za temperature do 400 °C, upotrebljivi su mnogi nelegirani feritno-perlitni čelici povisene granice razvlačenja. Ima takvih čelika za koje standardi itd. navode vrijednosti $\sigma_{m/100\ 000}$ i $\sigma_{1/100\ 000}$ do 500 °C, pa su do tih temperatura i upotrebljivi. Ima i čelika iz grupe konstrukcijskih čelika dobre zavarljivosti i velike čvrstoće (v. str. 105) kojima je povisena granica razvlačenja u toploj stanju povoljnijim sastavom i posebnim finesama pri proizvodnji i termičkoj obradi.

Polazna tačka za dalji razvoj specijalnih čelika postojane čvrstoće na povišenoj temperaturi bilo je saznanje da su povoljni dodaci molibdena, vanadijuma, volframa i drugih elemenata koji povisuju temperaturu rekristalizacije i imaju visoku tačku topljenja. Za feritne čelike najveću važnost ima molibden. Za primjene između 400 i 500, u krajnjem slučaju 600 °C, upotrebljavaju se čelici sa, po pravilu, <1% Mo; uz to sadrže ponekad Cr (<3%), V (do 0,5%) ili W (do 1%). Dovoljnu otpornost prema oksidaciji (stvaranju kovarine) do 600 °C imaju čelici sa 9 ili 12% Cr uz dodatke elemenata koji povisuju čvrstoću u toploj stanju, napose Mo, V, W i Nb.

Za područje temperature oko 600 °C imaju osobito značenje austenitni čelici na bazi kroma i nikla (~16% Cr, >13% Ni),

koji zbog znatno više temperature rekristalizacije imaju znatno stabilniju strukturu nego neaustenitni čelici. Dodatak volframa, molibdena, dušika i elemenata koji tvore odvojene karbide u ovim čelicima povećava postojanost čvrstoće na visokim temperaturama, isto tako mali dodaci bora i metala rijetkih zemalja, koji sprečavaju stvaranje mikropukotina na granicama zrna. Od neaustenitnih čelika najpostojaniju čvrstoću na visokim temperaturama imaju martenzitni čelici za poboljšanje, sa 12% Cr. Čelici sa Cr, Ni i Co (~10%) čine prelaz k legurama za temperature do 1000 °C: legurama Fe-Co-Cr-Ni sa ~20% od svakog elementa, legurama kobalta (~50% Co) i legurama Ni-Cr-(Co-Mo), većinom s manjim ili većim dodacima Al, Mo, N, Nb, Ta, Ti, V i W i malim dodacima bora i cera. U tabl. 30 navedeni su, primjera radi, podaci za dva čelika s postojanom čvrstoćom na vrlo visokoj temperaturi, a na sl. 137 prikazane su postojanosti različitih vrsta čelika u zavisnosti od temperature. (Za temperaturu iznad 1000 °C upotrebljavaju se sinterovani materijali visoke tačke topljenja, dobiveni metodama metalne keramike.)

Čelici s postojanom čvrstoćom na visokoj temperaturi pod trajnim opterećenjem upotrebljavaju se naročito u gradnji postrojenja za proizvodnju pare pod visokim pritiskom, parnih i plinskih turbina i aparata za kemijsku industriju.



Sl. 137. Trajna čvrstoća nekih čelika na višim i visokim temperaturama,

Vatrootporni čelici su čelici koji imaju na temperaturama iznad ~550 °C u poređenju s nelegiranim čelicima povisenu otpornost prema djelovanju plinova, po pravilu pod normalnim pritiskom. Najčešće je posrijedi atmosferski kisik, pa se ti čelici nazivaju i otpornima prema stvaranju kovarine. Ta otpornost — i vatrootpornost uopće — mjeri se grijanjem čelika u vazduhu na određenoj temperaturi kroz 120 sati uz 4 međuhlađenja; ako se pri tom ne oksidiše više od 1 g čelika na sat po kvadratnom metru površine metala, kaže se da je čelik vatrootporan na toj temperaturi. Na 50° višoj temperaturi količina oksidisanog metala ne smije prelaziti 2 g/m² h. Od vatrootpornih čelika zahtijeva se osim kemijske otpornosti još da imaju povoljna mehanička svojstva, da su dovoljno zavarljivi i obradljivi, da su u velikoj mjeri neosjetljivi prema temperaturnim promjenama i da imaju što je moguće manju sklonost ka krtosti. Svim tim čelicima vatrootpornost se osniva na sadržaju kroma, koji uzrokuje svojom oksidacijom stvaranje nepropusnog zaštitnog sloja na površini metala.

Dodatak nikla, nioba i/ili volframa osigurava postojanost čvrstoće, ne utičući bitno na vatrootpornost (v. naprijed čelike s postojanom čvrstoćom na visokoj temperaturi), dodatak silicijuma i aluminijskog (ne više od 2,3, odn. 1,5%), radi održanja obradljivosti

Tablica 30
ČELIK ČVRST NA VRLO VISOKOJ TEMPERATURI

Oznaka po DIN	Mehaničke osobine na 20 °C			Mehaničke osobine na povišenoj temperaturi, kp/mm ²						Stanje	
	σ_v kp/mm ²	σ_m kp/mm ²	δ_s %	$\sigma_{1/100\ 000}$			$\sigma_{m/100\ 000}$				
				550°	600°	650°	550°	600°	650°		
X 22 CrMoWV 12 1	60	75...90	12	10,5	3	—	13	4,5	—	poboljšano	
X 8 CrNiMoVNb 16 13	27	55...75	30	14	10	7	20	14	9	zakaljeno otvrdnjeno izlučivanjem	

Tablica 31
VATROOTPORAN ČELIK

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Kemijski sastav, %	Trajna granica puzanja $\sigma_{1/1000}$, kp/mm ² na temperaturi, °C					Otporan prema stvaranju kovarine do °C
			600	700	800	900	1000	
Č. 4970	X 10 CrAl 24	C 0,1, Cr 24,0, Al 1,5	3,0	0,8	0,3	0,08	0,03	1100
Č. 4578	X 15 CrNiSi 25 20	C 0,15, Cr 25,0, Mn 1,5,	10,0	4,5	2,0	0,9	0,4	1200
Č. 4579	X 12 NiCrSi 36 16	C 0,15, Mn 1,8, Ni 34,0	9,4	4,0	2,0	0,9	0,4	1200

Struktura čelika Č. 4970 je feritna, čelika Č. 4578 i 4579 austenitna.

i mehaničkih svojstava) vatrootpornost povisuje. Struktura vatrootpornih čelika najčešće je feritna ili austenitna, samo neke vrste niže legiranih čelika imaju feritno-perlitnu strukturu s mogućnošću odgovarajućih preobražaja. U tabl. 31 navedeni su sastav, svojstva i primjenljivost nekih vatrootpornih čelika. Vatrootporni su također čelici za ventile (v. str. 106) i neki čelici otporni prema koroziji. U pogledu otpornosti prema plinovima koji sadrže sumporuferitni su CrSi-čelici odn. CrSiAl-čelici otporniji nego austenitni CrNi-čelici, jer se pri sadržaju nikla stvara eutektik Ni-NiS koji ima nisku tačku topljenja (645 °C). Što je veći sadržaj nikla to je manja otpornost prema sumpornim plinovima. I feritni čelici manje su otporni prema sumpornim plinovima nego prema vazduhu.

Čelici otporni prema koroziji zahvaljuju za svoju hemijsku otpornost gotovo uvijek većem sadržaju kroma ili kroma i nikla. Stoga su neki od već dosad spomenutih čelika, koji radi postizanja drugih svojstava sadrže veći procent tih legirajućih elemenata, istovremeno i otporni prema rđanju, npr. specijalni čelici velike čvrstoće, čelici postojane čvrstoće na visokim temperaturama, čelici žilavi na niskim temperaturama, čelici koji se ne magnetizuju, vatrootporni čelici. Čelici kojima je otpornost prema koroziji glavno specijalno svojstvo mogu se podijeliti u otporne prema rđanju (nerđajuće čelike) i otporne prema kiselinama, a prema sastavu u kromne i u krom-nikalne. Kromni čelici sa 12 ... 14% Cr, ako im je površina fino brušena i polirana, ne rđaju na zraku ni pod djelovanjem vode i vodene pare, s većim sadržajem kroma i uz dodatak Mo, Ti, V oni su otporni i prema dušičnoj i sumporo-

rastoj kiselini. Mogu se zakaliti ako sadrže dosta ugljika i u zakaljenom stanju su najotporniji. Prema dušičnoj i octenoj kiselini, prema lužinama i solnim rastvorima otporni su austenitni krom-nikalni čelici; uz dodatak molibdена otporni su i prema sumporastoj kiselini, uz dodatak molibdена i bakra i prema sumporoj i razrijedenoj solnoj kiselini. Sadržaj kroma mora u svim čelicima otpornim prema koroziji biti najmanje 12%, a ima ga redovito max. 26%, u čeličnom livu 30%; nikla ima po pravilu max. 26%, ali u specijalnim čelicima otpornim prema koncentrovanoj sumporoj kiselini ima ga i do 42%. Ti niklom bogati čelici čine prelaz prema otpornim nikalnim legurama sa npr. 60% Ni; među ovima posebnu grupu čine legure Hastalloy, koje sadrže, pored nikla, i do 30% molibdена. (U običnom govoru i takve legure znaju se nazivati čelicima, mada ponekad sadrže vrlo malo željeza!) Molibdена u čelicima otpornim prema koroziji ima po pravilu do max. 5%, bakra max. 2,5%. Titan, niob i tantal dodaju se kao karbidotvorni elementi da bi se vezao ugljik i time smanjila sklonost k izlučivanju miješanih karbida kroma i željeza [npr. (Cr,Fe)₂₃C₆] na granicama zrna, što može dovesti do međukristalne (interkristalne) korozije. Isto se postiže jakim sniženjem sadržaja ugljika (do < 0,03% u čelicima ELC — Extra Low Carbon).

Za kompenzaciju povisuje se sadržaj Ni i N. Austenitni čelici ne mogu se očvršćavati kaljenjem, ali otvrnjavaju hladnom obradom, a neki, koji sadrže bakar i/ili molibden, očvršćavaju se starenjem. U tabl. 32 navedeni su neki čelici otporni prema koroziji i područja njihove primjene.

Tablica 32
ČELIK OTPORAN PREMA KOROZIJI

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN (Sastav)	Mehaničke osobine			Stanje	Primjena
		σ_y kp/mm ²	σ_m kp/mm ²	δ_t %		
Č. 4170	X 10 Cr 13	32	45	28	žarenog poboljšano	Cijevi, ventili, osovine, svornjaci i dr. dijelovi u mašinstvu, brodogradnji, prehrambenoj industriji, industriji tekstila, papira itd. koji dolaze u doticaju s vазduhom, vodom i parom; za turbinske lopatice
Č. 4172	X 20 Cr 13	50	75...90	14		
Č. 4570	X 22 CrNi 17	45	80...100	18...11	poboljšano	U mašinstvu i brodogradnji za dijelove u doticaju s morskom vodom
Č. 4173	X 40 Cr 13		80...140	18...8	poboljšano	Razni alat, kuglični ležajevi
Č. 4571	X 12 CrNi 18 8	25	60...75	50	gašeno	Standardni tip sa širokom primjenom u prehrambenoj i kemijskoj industriji, u kućanstvu; otporan prema octenoj i dušičnoj kiselini.
Č. 4572	X 10 CrNi ₁₈ 9 ^{Ti} _{Nb}	25	55...75	50...40	gašeno	Kao Č. 4571, ali otporniji, i prema interkristalnoj koroziji
Č. 4573	X 10 CrNiMo ₁₈ 10 ^{Ti} _{Nb}	26	55...75	40	gašeno	Za aparate u kemijskoj, prehrambenoj i papirnoj industriji; otporan prema sulfitnoj lužini
	X 5 CrNiMoCu 18 18	23	55...75	40...50	gašeno	Otporan prema razrijedenoj sumpornoj i solnoj kiselini
	X 5 CrNiMo 19 22					Otporan prema sumpornoj kiselini veće koncentracije na povišenoj temperaturi

Tablica 33
GRANICE SASTAVA ALATNIH ČELIKA

Grupa		Sastojci								
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Co	V	W	Ni
za hladnu obradu	nelegirani	0,15...1,3	0,1...0,3	< 0,4	P i S < 0,4					
	legirani	0,3...2,1	0,2...1	0,2...2	≤ 13	—	—	0,02	≤ 2	—
za toplu obradu		0,2...0,6	0,2...1	0,2...1	—	≤ 1	≤ 2	≤ 0,8	≤ 8,5	≤ 4
brzorezni		0,7...1,2	—	—	4	≤ 8	≤ 10	1...4	8...18	—

Alatni čelici

Alatni čelici služe za proizvodnju alata u širokom smislu te riječi, tj. od njih se prave, pored alata za hladno i toplo oblikovanje i alata za razdvajanje i usitnjavanje različitih materijala, također valjci za hladno i toplo valjanje, prese za plastične mase, tvrdi i prema habanju otporni dijelovi mjernih naprava, poljoprivredna oruđa kao srpovi, kose itd. Po pravilu se termički poboljšavaju. Oštra granica između alatnih i konstrukcionih čelika može se povući s obzirom na primjenu, ali ne i s obzirom na kemijski sastav i termičku obradu. Tako je npr. čelik Č. 4146, naveden naprijed kao konstrukcioni čelik za kuglice i valjčice kotrljajućih ležajeva, istovremeno i alatni čelik za proizvodnju valjaka za hladno valjanje čelika. Ipak, po pravilu alatni čelici sadrže ugljika više nego 0,6%, a konstrukcioni čelici manje.

Glavne karakteristike alatnih čelika jesu velika otpornost prema habanju i velika izdržljivost oštice; pored toga se od njih često traži da im se ne mijenjaju oblik i dimenzije pod djelovanjem povišene temperature; u mnogim slučajevima treba da budu dovoljno žilavi, kako bi podnosiли udarce i udarna naprezanja. Te karakteristike se ponekad izražavaju kvantitativnim pokazateljima koji su dobiveni konvencionalnim metodama upoređivanja, a vrlo često se uopće ne mogu izraziti brojevima. Zbog toga su za sada hemijski sastav, tvrdoća i praktični rezultati pri radu na određenom mjestu parametri na osnovu kojih se čelici ocjenjuju i klasifikuju. Samo u rijetkim slučajevima navodi se i čvrstoća, npr. 90...180 kp/mm² alatima za ekstruzione prese.

Alatni se čelici običavaju dijeliti na čelike za rad u hladnom stanju, za rad u vrućem stanju i brzorezne. Čelici za rad u hladnom stanju mogu biti ugljični (nelegirani) ili legirani, čelici za rad u vrućem stanju i brzorezni uvijek su legirani. Ponekad se izdvajaju u posebne grupe čelici za rad i u hladnom i u vrućem stanju i

nerdajući alatni čelici, a novije vrijeme su kao posebna grupa razviti čelici za obradu plastičnih masa.

U tabl. 33 navedene su granice sastava za glavne grupe alatnih čelika. Legirajući elementi kombinuju se u alatnim čelicima na različite načine. Vrlo nisko su legirani alatni čelici sa 0,6...1,4% C koji se zakaljuju u vodi, a samo malo legirani su žilavi alatni čelici sa ~0,5% C i alatni čelici za rad u hladnom stanju sa ~0,9...1,5% C, koji se zakaljuju u ulju. Srednje legirani su čelici za rad u hladnom stanju sa 1...2,3% C, koji se kale na vazduhu. Na njih se nadovezuju alatni čelici za rad u hladnom stanju koji imaju isti sadržaj ugljika, uz 12% Cr i do 4% V, 1% W, 1% Mo i 3% Co. Volframni čelici za rad u hladnom stanju imaju ~1% C, a W između 1 i 3,5%. Alatni čelici za rad u vrućem stanju su ili kromni sa 5...7% Cr i dodacima V, W i Mo, ili imaju sadržaj ugljika između 0,35 i 0,6% i mogu biti volframni sa 9...18% W i dodacima Cr, V i Co, ili molibdenski sa 5...8% Mo i dodacima Cr, V i W. Brzorezni čelici imaju sadržaj ugljika između 0,7 i 1,5% i mogu biti ili volframni sa 12...18% W i dodacima Cr, V i Co ili molibdenski sa 3,5...9% Mo i dodacima Cr, W, V i Co. Čelici sa ~1% C i po 2,5% Mo, W i V praktički su jednakovrijedni visokolegiranim brzoreznim čelicima, ali im je termička obrada teža. Osim navedenih legirajućih elemenata — od kojih krom poboljšava zakaljivost, volfram, molibden i vanadijum, kao karbidotvorni elementi, povećavaju tvrdoću i izdržljivost oštice, a kobalt daje postojanost strukture na povišenoj temperaturi — neki alatni čelici sadrže mangan, koji djeluje slično kromu, i nikal, koji povećava žilavost. U čelicima za pneumatske alate osobitu važnost ima silicijum, jer ti alati treba da budu i elastični (poput opruga, upor. str. 106).

Alatni čelici za rad u hladnom stanju. Od tih se čelicima izrađuju alati koji skidaju strugotinu (noževi strugova i rendi-

Tablica 34
NELEGIRANI ALATNI ČELIK

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Kemijski sastav				Tvrdoća poslije kajanja HRC ~	Primjena	
		C	Si	Mn	P i S po			
Č. 1540	—	0,5				60	Za srpove, sjekire, jeftine noževe, svrdla za drvo, čekiće i drugi ručni alat	
Č. 1740 Č. 1840	C 70 W1 C 85 W1	0,70 0,80				63 64	Za čekiće i alate za kovanje, probijače za papir i kožu, turpije za drvo, noževe poljoprivrednih strojeva	
Č. 1940	C 100 W1	1,0		< 0,25	< 0,25	≤ 0,025	65	Standardni kvalitet s najraširenijom upotrebom; za alate svih vrsta od kojih se zahtijeva tvrdoća, žilavost i otpornost prema habanju
Č. 1741	~ C 70 W2	0,65		< 0,25	< 0,25	≤ 0,035	63	Za turpije za drvo, noževe za siječenje slame i sl., noževe poljoprivrednih mašina, mašinske čeljusti i dr. mašinske dijelove, ukovnje
Č. 1947 Č. 1948	~ C 130 W2 ~ C 130 W2	1,25 1,35				65 65	Za sve vrste turpija	
—	C 60 W3	0,60	0,25 do 0,40	0,30 do 0,50		≤ 0,040	63	Za rezni alat, alat za obradu kamena
—	C 45 W3	0,45		0,80			58	Za noževe, sjekire, srpove itd.
Č. 1841	C 85 WS	0,80	0,10 do 0,40	0,40 do 0,80		≤ 0,035	65	Elektročelik velike čvrstoće, specijalno za kose; također za pile, sjekire, makaze

W = Werkzeugstahl, alatni čelik

S = Sensenstahl, čelik za kose

Tablica 35
LEGIRANI ALATNI ČELIK ZA RAD U HLADNOM STANJU

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN (Sastav)	Osobine	Primjena
Č. 3840	90 MnV 8	Dimenzijski postojan, izdržljive oštice, otporan prema habanju	Za navojni alat i mjerila, za komplikovane matrice i patrice (npr. za izradu pribora za jelo), probijače, alat za presovanje gume i vještačkih masa, za kaljenje osovina, za valjčice, svornjake, zupčanike i sl. u instrumentima, za alat za drvo
Č. 4140	90 Cr 3	Otporan prema pritisku i habanju	Za matrice i alat za presovanje, npr. kovanog novca, pribora za jelo itd.
Č. 4141	~ 115 CrV 3	Izdržljive oštice	Zamjenjuje Č. 6840
Č. 4142	~ 120 Cr 3	Tvrd, izdržljive oštice, otporan prema habanju	Za turpije i pile za metale
Č. 4143	140 Cr 3	Tvrd i otporan prema habanju	Za noževe za obradu mekog čelika i sivog liva, mesinga, bakra, kosti, celuloida, tvrdog drveta itd., svrdla za staklo, vajarska dlijeta, britve i tvrde turpije
Č. 4144	~ 100 Cr 6	Otporan prema pritisku i habanju, izdržljive oštice	Za kalibre, ekscentre, valjke napregnute pritiskom i habanjem, matrice i sl.
Č. 4147	(C 0,55, Mn 0,7, Cr 0,4)	Prokaljiv, u napuštenom stanju žilav i elastičan	Za alat za obradu drveta, takođe za mesarske noževe, bajonete i sl.
Č. 4150	~ X 210 Cr 12	Vrlo tvrd i žilav	Za sve alate, naročito komplikovana oblika, za precizne štance, štance za tanki čelični i metalni lim, noževe za obradu drveta, alate za štancanje gume, kože, kartona, matrice za izvlačenje, alat za mjerjenje, alat za obradu plastmasa, čeljusti i valjke za valjanje navoja na vijcima i dr.
Č. 4840	145 Cr 6	Dimenzijski postojan, otporan prema habanju, izdržljive oštice	Za alat za mjerjenje i kalibre, alat za rezanje navoja, zavrtače, noževe za obradu metala kad se stavljuju veći zahtjevi
Č. 6440	105 WCr 6	Dimenzijski postojan, prokaljiv, izdržljive oštice	Slično kao Č. 3840
Č. 6441	~ 110 WCrV 5	Izdržljive oštice, velike tvrdoće i otpornosti protiv habanja	Za noževe za obradu drveta, noževe za rezanje duhana, papira, kartona, filca i sl.
Č. 6840	~ 120 WV 4	Izdržljive oštice, tvrde površine i žilave jezgre	Za spiralna svrdla, razvrtače, glodala, alat za rezanje navoja, dlijeta za nasijecanje turpija, probijače, kirurške instrumente, zubarska svrdla i sl.

saljki, glodala, svrdla, turpije, pile, razvrtala, rezaljke loze itd.), alati za oblikovanje bez skidanja strugotine (makaze, štance, ukovnji i matrice, valjci itd.), alati za obradu kamena i za ruderarstvo, za usitnjavanje (pneumatska dlijeta itd.). Alati koji skidaju strugotinu treba da imaju veliku izdržljivost oštice i postojanost strukture pri napuštanju; od mnogih se traži da uz vrlo tvrdu površinu imaju žilavo jezgro. Taj se rezultat može postići zakaljivanjem samo uz vrlo velike kritične brzine ohladivanja, kakve imaju naročito nelegirani alatni čelici. Alati za obradu bez skidanja strugotine treba da budu otporni prema habanju i uz to dovoljno tvrdi i žilavi (naročito udarni alati). Alati za obradu kamena, pneumatska dlijeta za rudarske radove itd. treba da su i vrlo tvrdi, i žilavi, i otporni prema habanju, pa se ta kombinacija svojstava može često postići samo time da se radni dio oklopi tzv. tvrdim metalima (v. niže) ili da se na njih navari čelik otporan prema habanju (manganski).

Od alatnih se čelika redovito traži da budu jednoličnijeg sastava i da sadrže manje uključaka nego konstrukcijski čelici; kad se postavljaju najveći zahtjevi u pogledu kvaliteta, i nelegirani se alatni čelici stoga proizvode u električnoj peći; za manje zahtjeve zadovoljava i čelik proizведен u SM-peći.

U tablicama 34 i 35 navedeni su primjera radi neki alatni čelici za hladnu obradu materijala, nelegirani odn. legirani, s područjima primjene. Kako se iz tih tablica razabira, legirani alatni čelici za rad u hladnom stanju imaju kudikamo šire i raznoljnije područje primjene nego nelegirani; ta raznolikost primjene uslovjava postojanje velikog broja specijalnih čelika s izdiferenciranim svojstvima.

Alatni čelici za obradu u vrućem stanju treba da imaju, osim osobina koje se traže od svih alatnih čelika, takođe postojanu čvrstoću na povisenoj temperaturi, da budu postojane strukture pri napuštanju i otporni prema habanju na visokoj temperaturi, tako da alati zadržavaju oblik i dimenzije i pored toga što se zagrijavaju u doticaju s vrućim obrađenim metalom. Vijek trajanja alata određen je izdržljivošću oštice (otporom prema habanju) i otpornosti prema mrežastim naprslinama koje u gotovo svim alatima za vruću obradu nastaju u većoj ili manjoj mjeri uslijed djelovanja toplove. U tablicama 36 i 37 navedeni su neki čelici za vruću odn. za hladnu i vruću obradu i područja njihove primjene.

Brzorezni čelici su visokolegirani čelici koji uslijed svoje tvrdoće, koju zadržavaju i na povisenoj temperaturi, služe za prav-

Tablica 36
LEGIRANI ALATNI ČELIK ZA RAD U HLADNOM I VRUĆEM STANJU

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Osobine	Primjena
Č. 6442	35 WCrV 7	Otporan prema udaru, žilav, umjereno tvrd uz izdržljivost oštice	Za ručna i pneumatska dlijeta i sve vrste drugog pneumatskog alata, sjekače za gvožđe, meki i srednje tvrdi čelik i čelični liv, neke matrice za vruće presovanje, za utope
Č. 6444	60 WCrV 7	Otporan prema udaru i habanju, izdržljive oštice	Za sve vrste pneumatskog alata, makaze, matrice za presovanje; za probojni alat, za sječenje, za jako napregnute profilne noževe i profilna glodala, za alate za obradu drveta

Tablica 37
LEGIRANI ALATNI ČELIK ZA RAD U VRUĆEM STANJU

Oznaka po JUS	Oznaka po DIN	Tvrdoća poslije kaljenja, HR C	Primjena
Č. 5741	55 NiCrMoV 6	52	Za matrice i utepe za kovanje i presovanje čelika, alate mašina za kovanje, trajne kalupe za luke metalne i dr.
Č. 6450	X 30 WCrV 4 1	48	Za matrice i trnove za vruće presovanje čelika metala, kalupe za lijevanje metala pod pritiskom, makaze, manje kovačke utepe
Č. 6451	X 30 WCrV 9 3	45	Za matrice i trnove kod najvećih toplovnih naprezanja, kalupe za lijevanje pod pritiskom i za gravitaciono lijevanje bakra i njegovih legura, utepe za presovanje, matrice za proizvodnju vijaka, zakovica i stožaca ventila, za opruge otporne na visokim temperaturama; nije za alate koji se hlađe vodom
Č. 4751	38 CrMoV 51	53	Za matrice i trnove za presovanje čelika i metala, probijače i noževe za makaze, kalupe za lijevanje aluminijuma, magnezijuma i cinka pod pritiskom; za alate koji se moraju hladiti vodom

Ijenje alata kojima se može rezati metal, uz jednaku izdržljivost oštice, 5 ... 10 puta većom brzinom nego alatom od nelegiranog ili niskolegiranog alatnog čelika, odnosno, uz jednaku brzinu rezanja imaju mnogostruko veću izdržljivost oštice. To su ledeburitni čelici kojima je, dodatkom kroma, volframa, vanadijuma, molibdена, ledeburitna tačka pomaknuta prema nižim sadržajima ugljika. Da bi neki čelik mogao služiti za izradu brzoreznih alata, pored toga što mora imati osobine navedene kod alatnog čelika za vruću obradu, on mora imati takvu strukturu da je u zakaljenju tvrdnu osnovnu masu uložena određena količina tvrdih karbida.

SVJETSKA PROIZVODNJA I POTROŠNJA ČELIKA

Svjetska proizvodnja čelika u posljednjih sto godina prikazana je na dijagramu sl. 138. Brz porast svjetske proizvodnje čelika počeo je krajem prošlog stoljeća. Od 1880 do 1900 porasla je proizvodnja čelika u svijetu za više od $6\frac{1}{2}$ puta, prvenstveno uslijed razvijte industrije u USA i Njemačkoj, gdje je u tom periodu proizvodnja čelika narasla od 1,25 na 10,19 Mt (USA), odn. od 0,69 na 6,36 Mt (Njemačka), tj. za 8, odn. $9\frac{1}{2}$ puta. Do 1890 najveći producent čelika bila je Velika Britanija, te godine na prvo mjesto izbjiga USA, a 1900 Njemačka potiskuje Vel. Britaniju s

Tablica 38
BRZOREZNI ČELIK

Oznaka po JUS	Oznaka po SES	Sadržaj legirajućih elemenata %	Tvrdoća poslije kaljenja i napuštanja HR C	Primjena
Č. 6880	X 72 WCrMoV 18 5	W 18,0, Cr 4,0, V 1,0	64...66	Standardni čelik za sve vrste brzoreznog alata za obradu čelika do čvrstoće 100 kp/mm ²
Č. 6882	X 90 WV 12 45	W 12,5, Cr 4,0, V 2,0, Mo 0,8	64...65	Za alat za rezanje i obradu čelika i metala; svrdla, alat za rezanje navoja, noževe, glodala, pile
Č. 6980	X 75 WCrCoMoV 18 4	W 18,0, Cr 4,0, Mo 0,7, V 1,6, Co 5,0	64...66	Za rezanje tvrdih materijala velikim brzinama rezanja, naročito za grubu obradu
Č. 7680	85 WMo 26 50	W 6,5, Cr 4,0, Mo 5,0, V 2,0	63...66	Za obradu čelika i metala kod većih naprezanja na udar, naročito za grubu obradu i za spiralna svrdla, za obradu čelika čvrstoće iznad 100 kp/mm ²
Č. 9782	X 80 WCrCoMoV 18 4	W 18,0, Cr 4,0, Mo 0,8, Co 9,5	63...65	Za najveća naprezanja, za rezanje najtvrdih materijala, za rezanje bez hlađenja

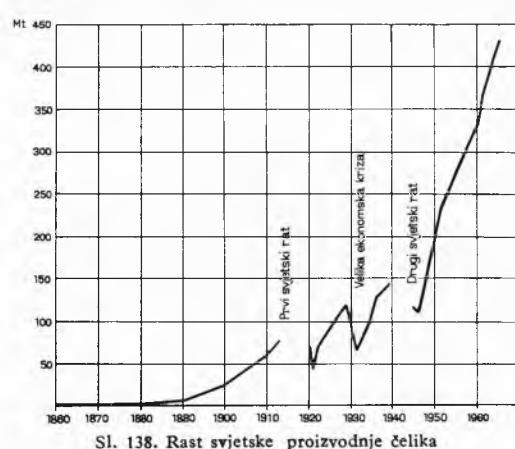
To se postiže sadržajem karbidotvornih metala volframa, molibdена i vanadijuma. Dodatak kobalta povisuje postojanost strukture na visokoj temperaturi. Ti čelici moraju imati dosta visok sadržaj ugljika, da bi pored karbida bila prisutna i zakaljiva osnovna masa. U tabl. 38 dati su sastav, svojstva i područje upotrebe nekih brzoreznih čelika. Za sastav vidi i str. 110.

Brzorezni čelici tvore u pogledu sastava prelaz k ljevenim tvrdim legurama feritne strukture s još većim sadržajima kroma, nikla, kobalta i/ili molibdена, uz volfram i ev. bor. Te legure služe najviše kao autogeno ili električki navareni tvrdi oklopi otporni prema habanju. Na njih se dalje nadovezuju ljevene legure volframa, kobalta i kroma s ugljikom, koje sadrže malo željeza ili su bez njega. Te su legure služile za oštice raznih alata, ali su danas gotovo sasvim zamijenjene sinterovanim legurama, tj. legurama koje se sastoje od zrnaca karbida (uglavnom) titana, tantalisa i volframa, slijepljenih pod pritiskom i na povišenoj temperaturi rastopljenim metalnim kobaltom. Pločice tih legura zavare se na rezni alat da bi tvorile njegovu oštricu.

Za alatne čelike otporne prema koroziji v. str. 109.

Čelici za preradu plastičnih masa presovanjem i brzoganjem jesu, pored pogodno izabranih alatnih čelika iz dosad spomenutih grupa, i specijalni čelici velike otpornosti prema habanju, dobre sposobnosti primanja sjaja pri poliranju, velike postojanosti oblika nakon termičke obrade i ev. postojanosti prema koroziji.

M. Juwan



Tablica 39
SVJETSKA PROIZVODNJA ČELIKA
u milionima tona (Mt) godišnje

Zemlja	1913	1938	1948	1958	1960	1965
SR Njemačka	15,8	17,9	5,6	22,8	34,1	36,8
Saar	2,6	1,2	3,5			
Francuska	4,7	6,2	7,2	14,6	17,3	19,6
Italija	0,9	2,3	2,1	6,3	8,2	12,7
Belgija	2,5	2,3	3,9	6,0	7,2	9,2
Luksemburg	1,4	2,5	3,4	4,1	4,6	
Nizozemska	0,1	0,3	1,4	1,9	3,1	
Evrpska zajednica za ugalj i čelik	32,8	22,8	58,0	72,8	86,0	
Velika Britanija	7,8	10,6	15,1	19,9	24,7	27,4
Švedska	1,0	1,3	2,4	3,2	4,7	
Španija	0,6	0,6	1,6	1,9	3,5	
Austrija	0,7	0,6	2,4	3,2	3,2	
Norveška	0,1	0,1	0,4	0,5	0,7	
Turska	—	0,1	0,2	0,3	0,6	
Danska	0,0	0,1	0,3	0,3	0,4	
Švicarska	0,0	0,0	0,2	0,3	0,3	
Portugal	—	—	—	—	0,3	
Grčka	—	—	0,1	0,1	0,2	
Irska	—	—	0,0	0,0	0,0	
Ostale zemlje OECD	13,0	17,9	27,5	34,5	41,3	
Poljska	1,9	2,0	5,7	6,7	9,1	
Čehoslovačka	1,9	2,6	5,5	6,8	8,6	
DR Njemačka	1,7	0,3	3,5	3,8	3,9	
Rumunija	0,3	0,4	0,9	1,9	3,4	
Madarska	0,6	0,8	1,6	1,9	2,5	
Jugoslavija	0,2	0,4	1,1	1,4	1,8	
Bugarska	—	0,0	0,2	0,2	0,6	
Finska	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	
Ostale države Europe bez SSSR	6,7	6,6	18,7	23,0	30,3	
Ukrajina		4,5	21,7	26,2	37,0	
Ostale zemlje SSSR		14,1	33,2	39,1	54,0	
SSSR	4,9	18,0	18,6	54,9	65,3	91,0
Evropa i SSSR	70,5	65,9	159,1	195,6	248,4	
Japan	0,2	6,5 (0,5)	1,7 (11,1)	12,1 (18,4)	22,1 (15,0)	41,2
Kina	0,1	1,0	1,3	1,8	3,3	6,4
Indija	0,1	0,1	0,4	0,6	1,2	
Koreja, Sjeverna	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	
Tajvan	—	0,0	0,0	0,0	0,0	
Koreja, Južna	—	0,0	0,0	0,0	0,2	
Izrael	—	—	—	0,0	0,1	
Pakistan	—	0,0	0,0	0,0	0,0	
Tajland (Sijam)	—	0,0	0,0	0,0	0,0	
Azija	8,1	3,1	25,5	44,6	64,4	
Južnoafrička republika	0,3	0,6	1,8	2,1	3,2	
Rodezija	—	0,0	0,1	0,1	0,1	
UAR	—	—	—	—	0,2	
Afrika	0,3	0,6	1,9	2,2	3,5	
USA	31,8	28,8	80,4	77,3	90,0	119,3
Kanada	1,1	1,2	2,1	4,0	5,3	9,1
Brazil	0,1	0,5	1,4	1,8	2,9	
Meksiko	0,1	0,3	1,0	1,5	2,4	
Argentina	—	0,1	0,2	0,3	1,4	
Cile	—	0,0	0,3	0,4	0,4	
Kolumbija	—	—	0,1	0,2	0,2	
Peru	—	—	0,0	0,1	0,1	
Urugvaj	—	—	—	0,0	0,0	
Venezuela	—	—	—	0,0	0,6	
Amerika	30,2	83,4	84,3	99,6	136,4	
Australija	1,2	1,2	3,2	3,8	5,5	
SVIJET bez Kine	75,0	110,2	155,8	263,0	327,6	443,3

malja svijeta u razvoju proizvodnje čelika poslije drugog svjetskog rata pokazuje tabl. 39. Iz nje se vidi da su 1948 USA još proizvodile više od polovine svega na svijetu proizvedenog čelika, a 1967 samo 27%; učešće Sovjetskog Saveza, koji je poslije rata zauzeo drugo mjesto po obimu proizvodnje, poraslo je u tom periodu od 12 na 20%; na trećem mjestu su udružene zemlje Evropske zajednice za ugalj i čelik, kojima je zajedničko učešće na svjetskoj proizvodnji između 1948 i 1965 naraslo od 16 na 19%. Vrlo je brz bio razvoj čelične industrije u Japanu, koji je poslije rata proizvodnjom čelika natkrilio u Vel. Britaniju i Njemačku. Iz tablice se vidi i tendencija manje razvijenih zemalja da brzim tempom povećaju proizvodnju čelika.

Do velikih skokova u porastu proizvodnje čelika dolazi nakon drugog svjetskog rata zahvaljujući povećanoj potrošnji u cijelom svijetu, kako zbog obnove nakon rata tako još više zbog brzog tempa industrijalizacije u svim zemljama, a naročito u socijalističkim državama i zemljama u razvoju. Ovo je omogućeno intenzifikacijom postojećih procesa proizvodnje i uvođenjem novog postupka za dobivanje čelika u oksigenskim konverterima (LD-proces).

Proizvodnja čelika u Jugoslaviji. Između dva svjetska rata industrija gvožđa i čelika je u Jugoslaviji stagnirala. Tek neposredno pred drugi svjetski rat došlo je do izgradnje većih proizvodnih kapaciteta u željezarama Zenica i Jesenice i do uvođenja ranih proizvodnji čelika. Najveća predratna proizvodnja (1939) iznosila je 235,4 kt čelika. U toku rata dolazi do opadanja, pa često i do prekida i obustave proizvodnje uslijed ratnih akcija. Najviše su oštećeni rudnici željezne rude u Ljubiji i Varešu, a željezari u Zenici proizvodnja je opala od 79,4 kt (1939) na 5 kt (1944).

U prvim poslijeratnim godinama 1945 i 1946 trebalo je najhitnije izvršiti obnovu oštećenih postrojenja. Ovaj zadatak je uspešno izvršen, i već 1947 s istim predratnim postrojenjima povećana je proizvodnja iz 1939 za 32%. Vremenski period od 1948 do 1958 korišten je za intenzivnu izgradnju novih proizvodnih kapaciteta kako u postojećim željezarama u Zenici, Jesenicama, Sisku, Smederevu, Ravnama, Štorama, Zemunu, Varešu i u rudniku Ljubiji, tako i za izgradnju posve novih željezara u Nikšiću i Ilijašu. Zahvaljući ovim investicijama proizvodnja je povećana od 312 kt (1947) na 1113 kt (1958). Uhodavanjem izgrađenih postrojenja i osvajanjem novih tehnoloških postupaka proizvodnja je 1963 dalje povećana na 1575 kt.

Proizvodnja čelika po našim željezarama u periodu od 1939 do 1966 prikazana je na tablici 40. Cifre proizvodnje po pojedinim godinama pokazuju prilično ravnomjeran porast od 1946 do 1961. U periodu 1961–1963 porast je usporen. U tablici 40 nije obuhvaćen sirov čelik proizveden u livnicama čelika u preduzećima van crne metalurgije. Proizvodnja takvog sirovog čelika iznosila je 12,5 kt u 1963 i 13,2 kt u 1965.

G. 1967 završena je prva faza izgradnje željezare Skoplje, a do 1970 treba da se izvrše rekonstrukcije u ostalim željezarama u cilju otklanjanja uskih grla i proširenja asortimana proizvodnje. Na taj način bi se krajem 1970 proizvodnja čelika dovela na nivo od ~ 3200 kt godišnje.

Daljim razvojem treba, prema ocjeni naših stručnjaka, proizvodnja čelika u Jugoslaviji da dosegne 4800 kt godišnje do konca 1975. godine.

Za postizanje proizvodnje sirovog čelika prikazane u tablici 40, kao i za njenu dalju preradu u valjane, vučene, ljuštene i brušene proizvode, izgrađeni su proizvodni kapaciteti u željezarama kao što je prikazano u tablici 41.

Visoke i elektroredukcione peći snabdijevaju se uglavnom domaćim željeznim rudama iz rudnika Vareš i Ljubija. Osim kokskare u željezari Zenica, koja snabdijeva koksom visoke peći u Zenici, postoji u sklopu hemijske industrije koksara Lukavac, koja isporučuje koks za potrebe ostalih preduzeća crne i obojene metalurgije.

Svjetska i domaća potrošnja čelika. Tablica 42 prikazuje vidljivu potrošnju čelika po stanovniku u pojedinim godinama perioda 1913–1960 i ocijenjeni nivo godišnje potrošnje čelika po stanovniku u periodu 1972–1975. Pod vidljivom potrošnjom (engl. »apparent consumption«) Evropska ekonomска komisija Ujedinjenih naroda razumijeva proizvodnju domaćih željezara kojoj

ČELIK

Tablica 40
PROIZVODNJA SIROVOG ČELIKA U SFRJ OD 1939. DO 1966.
u hiljadama tona (kt) godišnje

Željezara	1939	1946	1948	1952	1955	1958	1961	1963	1965	1966
Jesenice	124,5	118,3	169,4	176,3	241,3	271,7	326,7	328,6	360,6	391,0
Ravne	7,6	10,8	13,3	18,4	37,1	46	56,2	66,9	98,4	100,5
Štore	8	12,7	22,5	24,6	30,4	34,8	35,0	37,5	38,5	
Sisak					47,2	102,6	142,8	117,3	190,0	198,0
Zenica	79,4	46,5	139	182,4	395,3	563,4	773,1	807,9	829,4	884,3
Smederevo	16	13,9	22,6	40,5	53,1	60	79,8	82,1	82,2	86,0
Nikšić	—	—	—	—	—	39,2	108,9	137,6	157,8	159,2
Ukupno SFRJ	235,5	202,2	366,8	442,2	798,5	1113,3	1522,3	1575,4	1755,9	1857,4

Tablica 41
GLAVNI PROIZVODNI KAPACITETI ŽELJEZARA U SFRJ (1967)

Željezara	Koksne baterije	Viseće peći	Elektro-redukcione peći (T.H.)	SM-peći	LD-konverteri	Elektro-peći za proizvodnju čelika	Valjaonice poljoprivredna	Valjaonice profila	Valjaonice plosnatih proizvoda	Valjaonice cijevi	Hladne valjaonice plosnatih proizvoda	Vlačionice žice, šipki i cijevi	Izljetonice i brusonice šipki
Jesenice	—	2	—	6	—	2	1	5	4	—	1	1	1
Ravne	—	—	—	1	—	—	—	4	—	—	—	1	1
Štore	—	3	—	1	—	—	1	—	2	—	—	—	—
Sisak	—	3	—	2	—	—	—	2	—	1	—	1	—
Zenica	4	3	—	10	—	—	—	—	6	—	—	—	—
Smederevo	—	—	—	2	—	—	—	1	—	—	—	1	—
Nikšić	—	—	—	3	—	—	—	—	3	1	—	1	—
Skoplje	—	—	5	—	2	—	—	—	—	2	—	1	—

je dodata uvezena količina čelika i od koje je odbijena izvezena količina čelika. Iz potrošnje po stanovniku razabira se golema razlika između visokoindustrijalizovanih zemalja zapadne Evrope i Sjeverne Amerike, u kojima potrošnja čelika iznosi do 682 kg po stanovniku, i nerazvijenih zemalja ostalih kontinenata, pa i nekih zemalja Evrope, u kojima je potrošnja po stanovniku veoma niska. Uprkos velikim napora koji su učinjeni, u našoj zemlji potrošnja čelika je još uvek ispod svjetskog prosjeka (92 kg u SFRJ prema 136 u svijetu 1960). Tek 1975 preči čemo svjetski prosjek potrošnje čelika (predviđa se 208 kg u SFRJ prema 189 u svijetu).

Paralelno s povećanjem potrošnje čelika mijenja se i assortman proizvodnje. Opća je tendencija u svijetu da učešće plosnatih proizvoda i cijevi u ukupnoj proizvodnji čelika sve brže raste na račun učešća profila. Ovakav razvoj je posljedica izgradnje modernih kontinuiranih i polukontinuiranih valjačkih pruga za masovnu, kvalitetnu i jeftinu proizvodnju traka i limova. Ovi plosnati proizvodi ne troše se samo u brodogradnji i industrijskim automobilskim i šinskim vozila, već se njihovom preradom pomoću nove tehnologije zavarivanja, hladnog valjanja, toplog i hladnog presovanja dobivaju potrebitni oblici profila i cijevi, pa i otkivaka i odljevaka koji su konkurentni toplovaljanim, lijevanim i kovanim proi-

Tablica 42

VIDLJIVA POTROŠNJA ČELIKA U SVIJETU 1965.

Zemlja	Ukupno, Mt/god.	Po stanovniku, kg/god.	Zemlja	Ukupno, Mt/god.	Po stanovniku, kg/god.
Švedska	5,3	682	Čile	0,6	70
USA	127,7	656	Meksiko	2,7	64
Njemačka S.R.	31,9	540	Rodezija	0,3	60
Kanada	10,4	531	Taiwan	0,6	50
Čehoslovačka	7,4	524	Saudska Arabija	0,3	47
Australija	5,8	514	Malezija	0,4	46
Njemačka, D.R.	7,5	439	Brazil	3,1	39
Velika Britanija	23,1	424	Peru	0,4	34
SSSR	86,6	376	Tunis	0,1	31
Norveška	1,4	365	Iran	0,7	30
Danska	1,7	361	Turska	0,9	27
Svica	2,0	334	Kuba	0,2	27
Francuska	16,2	331	Irak	0,2	26
Belgija i Luksemburg	3,2	330	UAR	0,8	26
Nizozemska	3,8	313	Kolumbija	0,4	24
Japan	28,8	294	Filipini	0,8	24
Austrija	2,1	286	Urugvaj	0,1	24
Poljska	8,5	271	Alžir	0,3	23
Finska	1,2	262	Indija	7,5	16
Novi Zeland	0,6	239	Sirija	0,1	16
Italija	12,1	235	Tajland (Sijam)	0,5	15
Madarska	2,2	220	Kina	10,9	14
Južnoafr. republika	4,2	210	Maroko	0,2	13
Rumunija	3,9	206	Vijetnam, Južni	0,0	9
Spanija	6,1	194	Pakistan	0,8	8
Izrael	0,5	187	Cejlон	0,1	7
Bugarska	1,2	152	Ist. Afrika	0,2	6
Hongkong	0,6	151	Nigerija	0,3	6
Venezuela	1,2	138	Kongo, D.R.	0,0	3
Jugoslavija	2,4	125	Indonezija	0,3	3
Argentina	2,5	114	Zambija	0,0	3
Liban	0,3	111	Vijetnam, N.R.	0,1	2
Grčka	0,7	85	Malawi	0,0	1
Irška	0,2	81			
Portugal	0,7	74			

Tablica 43
UČEŠĆE ASORTIMANSKIH GRUPA PROIZVODA U SVJETSKOJ POTROŠNJI ČELIKA

od 1955. do 1957. godine

Region	Profil %	Cijevi %	Plosnati proizvodi %	Potrošnja čelika po stanovniku, kg/god.
Sjeverna Amerika	33,5	12	54,5	576
Zapadna Evropa	52,3	6,9	40,8	222
Istočna Evropa	59,8	10,8	29,4	201
Australija	42,5	13,5	44	232
Daleki Istok	50,6	7,7	41,7	15
Latinska Amerika	52,4	17,1	30,5	38
Afrika	57,7	7,3	35	19
Srednji Istok	61,7	19,1	19,2	20

Tablica 44
CIJENA LEGIRANIH ČELIKA
u odnosu na cijenu ugljičnog čelika

Oznaka po DIN	Faktor	Oznaka po DIN	Faktor
St 35	1,0	X 15 CrNiSi 20 12	10,7
15 Mo 3	2,0	X 10 Cr 13	6,2
13 CrMo 4 4	2,2	X 12 CrNi 18 8	9,0
10 CrMo 9 10	3,1	X 10 CrNiTi 18 9	10,0
X 8 CrNiNb 16 13	14,3	X 10 CrNiMoTi 18 10	12,4
X 10 CrAl 7	6,2	X 5 CrNiMoCuTi 18 18	18,3
X 20 CrNiSi 25 4	9,8	X 8 CrNiMoNb 16 17	18,1

zvodima zahvaljujući u prvom redu svojoj manjoj težini. Na tablici 43 prikazano je procentno učešće profila, plosnatih proizvoda i cijevi u prosječnoj potrošnji čelika po svjetskim proizvodnim regionima u periodu od 1955 do 1957. Iz datih podataka jasno se vidi veliko učešće plosnatih proizvoda u razvijenim zemljama. Isto je tako veliko učešće profila u nerazvijenim regionima. Što se tiče cijevi, njihova potrošnja zavisi od razvijenosti industrije nafta i transporta energetskih medija cijevnim vodovima.

Cijena čelika. Za orijentaciju može se navesti da je 1960 jedna tona ugljičnog čelika u obliku lima 1 mm u SR Njemačkoj stajala 600 DM, a odnos cijena različitih legiranih čelika i cijene ugljičnog čelika St 35 bio je kako pokazuje tabl. 44. U SFRJ cijena čelika Č. 0145 u obliku lima debljine 2 mm iznosila je 1687 Nd/t.

S. Grgić

LIT.: Opća djela, priručnici itd. G. Guzzoni, *Gli acciai communi e speciali*, Milano 1952. — D. Daevs (Bearb.), *Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen*, Düsseldorf 1953. — C. Johansen, *Geschichte des Eisens*, Düsseldorf 1953. — J. M. Camp, C. B. Francis, *The making, shaping and treating of steel*, Pittsburgh 1957. — A. Bertocci, E. Mariani, *I metalli e l'acciaio*, Terni 1960. — Akad. Verein Hütte, *Taschenbuch für Eisenhüttenleute*, Berlin 1961. — W. Dröge, *Der Werkstoff Stahl*, Leipzig 1962. — H. Grothe (Herausg.), *Lexikon der Hütten-technik* (Lueger Lexikon der Technik, Bd. 5), Stuttgart 1963. — I. Class, Stähle, u djelu: W. Foerst (Herausg.), *Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie*, Bd. 16, Berlin 1965. — F. Lüth, H. König, *The planning of iron and steelworks*, New York 1967. — Struktura i termička obrada čelika. D. K. Bullens & al., *Steel and its heat treatment*, 3 vol., New York 1948/9. — W. Crafts, J. L. Lamont, *Hardening and steel selection*, New York 1949. — A. H. Minkevič, *Химико-термическая обработка стали*, Москва 1950. — C. E. Enos, W. E. Fontaine, *Elements of heat treatment*, New York 1953. — И. И. Корнилов, *Железные сплавы*, 3 t. Москва-Ленинград 1945/56. — W. Ordinanz, *Einführung in das Härteln*, München 1956. — F. Wever, A. Rose, W. Peter, W. Straßburg, L. Rademacher, *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*, 2 Teile, Düsseldorf 1954/58. — H. Rufus, *Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe*, Düsseldorf 1958. — B. C. Мескин, *Основы легирования стали*, Москва 1959. — A. Stüdenmann, *Wärmebehandlung der Stähle*, München 1960. — K. Daevs, *Zustandsschaubild der unlegierten Stähle*, Düsseldorf 1960. — A. П. Гулев, *Термическая обработка стали*, Москва 1960. — А. А. Шмыков, *Справочник термиста*, Москва 1961. — М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахшадов (ред.), *Металлование и термическая обработка стали*, 2 t., справочник, Москва 1961. — D. Horstmann & al., *Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstofflegierungen*, Düsseldorf 1961. — H. Ф. Болховитинов, *Металлование и термическая обработка*, Москва 1961. — S. Guralj, *Termička obrada čelika*, Beograd 1962. — M. A. Grossman, *Principles of heat treatment*, Cleveland 1962. — M. E. Blamptier, *Металлование и термическая обработка*, Москва 1963. — Proizvodnja čelika. R. Durrer, *Die Metallurgie des Eisens*, Berlin 1934. — AIMME, *Basic open hearth steel making*, New York 1951. — K. Eichel, *Das basische Windfrischverfahren*, Berlin 1952. — K. G. Trubin, *Der Siemens-Martin-Prozess*, Berlin 1953. — J. L. Bray, *Ferrous process metallurgy*, New York 1954. — K. Г. Трубин, *Металлургия стали*, Москва 1957. — P. Rayson, *The metallurgy of tool steel*, New York 1962. — F. Sommer, E. Plöckinger, *Elektrostahlerezeugung*, Düsseldorf 1964. — E. Plöckinger, H. Straube, *Die Edelstahlherzeugung*, Berlin - New York 1965. — Prerada čelika. E. Siebel, *Die Formgebung im bildsamen Zustande*, Düsseldorf 1937. — F. Stanković, *Mašine alatke i industrijska proizvodnja maština*, Deo II: Obrada metala bez rezanja, Beograd 1950. — H. Hoff, Th. Dahl, *Grundlagen des Walzverfahrens*, Düsseldorf 1950. — A. Gelei, *Walzwerks- und Schmiedemaschinen*, Berlin 1954. — П. В. Суслов, *Кузнецко-прессовое оборудование*, Москва 1956. — A. Zelikow, *Lehrbuch des Walzwerksbaus*, Berlin 1957. — A. H. Broxhanov, Kovka i obtjemna štampanja, Москва 1957. — H. Sedlacek, *Walzwerke*, Berlin 1958. — B. Chalmers, *Physical metallurgy*, New York 1959. — A. A. Королев, *Механическое оборудование прокатных цехов*, Москва 1959. — П. И. Полухин и др., *Прокатное производство*, Москва 1960. — B. Božić, *Fizička metalurgija*, Beograd 1960. — R. E. Beynon, *Roll and mill layout*, Pittsburgh 1960. — G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*, New York 1961. — M. Čaušević, *Valjanje i kalibriranje*, Beograd 1962. — Коллектив авторов, *Прокатное производство*, 2 t., Москва 1962. — R. W. Cahn, *Physical metallurgy*, New York-London 1965 — B. Jaoul, *Étude de la plasticité et application aux métaux*, Paris 1965. — Ю. А. Алексеев, *Вступление к теории обработки металлов давлением, прокатом и резанием*, Хар'ков 1967. — Селици за одредене срвре. C. A. Zapffe, *Stainless steels*, Cleveland 1949. — A. Michel, *Aciers à oatis*, Paris 1950. — J. H. G. Monypenny, *Stainless iron and steel*, 2 vol., London 1951. — Автомобилни конструционни стали, справочник, Москва 1951. — И. М. Лейкин, В. Т. Чернавкин, *Низколегированные строительные стали*, Москва 1952. — В. А. Делле, *Легированная конструкционная сталь*, Москва 1953. — L. Aitchison, W. I. Pumphrey, *Engineering steels*, London 1953. — E. Houdremont, *Handbuch der Sonderstahlkunde*, Düsseldorf 1956. — A. C. Займовский, А. С. Чудновская, *Магнитные материалы*, Москва 1957. — W. Künscher, H. Kilger, H. Biegler, *Technische Baustähle*, Halle 1958. — Stahlschlüssel, Магнитицких а. Н. 1959. — М. Ф. Алексеенко, *Структура и свойства конструкционных и нержавеющих сталей*, Москва 1962. — М. В. Приданцев, К. А. Панская, *Стали для машиностроения*, Москва 1959. — F. Rapatz, *Die Edelstähle*, Berlin 1962. — R. Zaja, *Acciai speciali da costruzione*, Milano 1962. — W. Künscher, H. Kulke, *Baustähle der Welt*, Leipzig 1964. — Ključ za čelik, Zagreb 1966. — Ф. Химушкин, *Нержавеющие стали* 1967. — Економика. United Nations' Economic Commission for Europe, Long-term trends and problems of the European steel industry, Genève 1959. — American Society for Metals, *Metals handbook*, Novelty, Ohio 1961. — Časopisi. Кузнецко-штамповочное производство, Москва; Металлование и термическая обработка металлов, Москва; Сталь, Москва. — Stahl und Eisen, Düsseldorf; Archiv für das Eisenhüttenwesen, Düsseldorf; Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf. — Métaux (Corrosion, Industries), Paris. — Iron and Steel, London; Journal of the Iron and Steel Institute, London; Metal Industry, London. — Jernkontorets Annaler, Stockholm. — Metallurgia Italiana, Milano. — Steel, Bruxelles. — Blast Furnace and Steel Plant, Pittsburgh; Iron Age, Philadelphia; Steel, Cleveland, Ohio; Steel Facts, New York.

K. Kapetanović M. Juvan H. Numić
M. Čaušević S. Grgić A. Sarajlić

ČIŠĆENJE PLINOVA, u širem smislu, skup svih metoda kojima se u tehniči iz plinova uklanjuju primjese nepoželjne u njihovoj primjeni (nečistoće, onečišćenja), bez obzira na to jesu li te primjese plinovite, tekuće ili čvrste. Za uklanjanje plinovitih primjesa iz plinske smjese upotrebljavaju se operacije obrađene na drugom mjestu u ovoj enciklopediji: adsorpcija, apsorpcija i kemijska reakcija; u ovom članku bit će obradeno čišćenje plinova u užem smislu, tj. metode uklanjanja čvrstih i tekućih onečišćenja suspendiranih u plinu. Iste se metode upotrebljavaju u tehniči i kad glavna svrha operacije nije da se dobije čist plin, nego da se dobije čvrsta ili tekuća tvar koja je u plinu suspendirana. Primjer za primjenu čišćenja plinova od onečišćenja jesu: čišćenje zraka u proizvodnji fotografiskih filmova, farmaceutskih proizvoda, namirnica za život i u lakirnicama; zraka koji ulazi u eksplozione motore; čišćenje sumpor-dioksida u kontaktnom načinu proizvodnje sumporne kiseline iz pirita; čišćenje otpadnog zraka iz pilana i radionica za obradu drva, brušenje kamena ili metalova, iz mlinova i prostorija gdje se fino samljeven materijal pakuje u vreće; čišćenje dimnih plinova iz kotlovnica, tvornica cementa itd. Čišćenje otpadnih plinova iz talionica, sušara i sl. ide i za tim da očisti plin i za tim da iz njega dobije vrijedni suspendirani materijal. Odvajanje čvrstog produkta suspendiranog u plinu obavlja se metodama čišćenja plinova pri dobivanju mlijeka, jaja, sapuna itd. u prahu, u proizvodnji cink-oksida i čade, pri pneumatskom transportiranju i sušenju materijala, itd.

Odvajkada se u nekim obrtima i industrijama stvara prah i dim, i odavna su se u nekim slučajevima poduzimale mjere da se time ne zagaduju radne prostore i atmosfera okoline — naročito ako je to zahtijevala takoder ekonomika postupka iako su na to prisiljavali zakonski propisi. Ali tebi u novije vrijeme, s intenzivnim razvojem industrije, s porastom svijesti o štetnosti zagadnje atmosfere i sve strožim propisima zakonodavca radi sprečavanja njenog zagadnivanja, sa sve većim zahtijevima tehničke i ekonomike postupaka u pogledu čistoće plinova i rekuperiranja u njima suspendiranog praha, tehniku je čišćenja plinova postala posebno važna grana tehnologije, počelo je naučno istraživanje radi objašnjenja teorijskih osnova starih postupaka i razvijanja novih, izrasla je industrija koja izrađuje aparate za čišćenje plinova, s poduzećima često specijaliziranim za izradu i razvoj aparata namijenjenih određenim granama proizvodnje: tvornicama čade, levaonicama, tvornicama cementa, talionicama metala, željezarama, mlinovima, kemijskim tvornicama, tvornicama boja, tvornicama plastičnih masa, rudarstvu itd. Usljedi toga su stari postupci u posljednjim godinama znatno dojereni, te npr. skruberi i mehanički filtri konkuriraju elektrofiltrima pri uklanjanju submikronskog praha iz plinova, a elektrofilteri se upotrebljavaju također za čišćenje vrucih plinova i plinova pod pritiskom. Među važnija nova dostignuća tehnike čišćenja plinova ide automatska regulacija rada elektrofiltera i gradnja elektrofiltera od prefabriciranih jedinica po modulnom sistemu, što omogućava njihovu primjenu i u manjim postrojenjima.

Veličina čestica praha. Za čišćenje plinova indiferentno je najčešće da li su u njima suspendirane čvrste čestice ili sitne kapljice (u nastavku će se mahom govoriti naprosto o prahu i o dosprišavanju), ali je vrlo važan stupanj disperzije suspendirane tvari. Kako se vidi iz sl. 1, najkrupnije čestice različitih onečišćenja u zraku mogu od najsitnijih biti veće po linearnim dimenzijama i više od hiljadu puta, tj. po volumenu više od milijardu puta; razumljivo je da se za uklanjanje jednih i drugih neće moći upotrijebiti isti aparat, ili i ista metoda, pa je veličina čestica važan parametar pri izboru i konstrukciji aparata za čišćenje plinova. Za karakterizaciju veličine jedne čestice praha upotrebljava se najčešće njezin srednji promjer (d) ili ekvivalentni promjer d_e (tj. promjer kugle istog volumena) u mikronima (mikrometrima, μm), ali kako pri uklanjanju čestica iz plina redovito nije važna samo njihova veličina, nego također specifična masa i oblik, često je uputno veličinu pojedine čestice karakterizirati njenom *srednjom brzinom padanja* (*tonjenja*) (w) u mirujućem zraku; ta brzina zavisi od ekvivalentnog promjera d_e , specifične mase ρ_e čestice, od specifične mase ρ_z i dinamičkog viskoziteta zraka η_z prema Stokesovom zakonu:

$$w = (\rho_e - \rho_z) \frac{g d_e^2}{18 \eta_z},$$

gdje je g ubrzanje sile teže. Zbog $\rho_e \ll \rho_z$ može se pisati

$$w = \rho_e \cdot g d_e^2 / 18 \eta_z. \quad (1)$$

Iz toga se lako izračuna srednja brzina tonjenja iste čestice u zraku druge temperature i/ili određenog pritiska (drugog viskoziteta), ili u kojem drugom plinu različitog viskoziteta, ako je poznata brzina tonjenja u zraku određene temperature i/ili određenog pritiska (određenog viskoziteta).

U kolektivu čestica, npr. skupu svih čestica sadržanih u određenom volumenu plina, čestice nisu sve iste veličine. Da bi se stupanj disperznosti u kolektivu čestica nejednake veličine ka-