



Tihana Kostadin

ČELICI I ŽELJEZNI LJEVOVI

Materijali II

Copyright ©
Veleučilište u Karlovcu 2017.

ISBN (on line) 978-953-7343-91-0

Izdavač: Veleučilište u Karlovcu

Za izdavača: dr. sc. Branko Wasserbauer, prof. v. š.

Recenzenti: Tomislav Božić, dipl. ing., Marijan Brozović, dipl. ing., prof. dr. sc. Miljenko Math

Grafički urednik: Miroslav Kodrić

Objavljivanje ovog veleučilišnog nastavnog materijala odobrilo je Povjerenstvo za izdavačku djelatnost Veleučilišta u Karlovcu Odlukom o izdavanju publikacije br. 7.5-13-2016-4

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Studij strojarstva



Tihana Kostadin

ČELICI I ŽELJEZNI LJEVOVI

Materijali II

Interna skripta

Karlovac, 2017.

Predgovor

Ovaj nastavni materijal namijenjen je studentima *Stručnog studija strojarstva* na Veleučilištu u Karlovcu, ali je pisan i prilagođen tako da ga mogu koristiti i studenti drugih srodnih tehničkih fakulteta.

Naime, tematika koja se obrađuje (čelici i željezni ljevovi), obuhvaća dio gradiva iz kolegija *Materijali II*, na Veleučilištu u Karlovcu, prema programu 3. semestra stručnog preddiplomskog studija strojarstva.

Osnova za ovu skriptu su nastavni materijali s Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (prof. Tomislav Filetin) i s Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci (prof. Loreta Pomenić). Ovim izuzetnim profesorima i znalcima zahvaljujem na predanom radu, jer će njihovi odlični nastavni materijali još mnogim generacijama biti vodič kroz gradivo iz materijala u strojarstvu. Temeljem gradiva iz ovih udžbenika puno sam naučila i to mi je poslužilo kao osnova u radu, a također sam u ovu skriptu ugradila puno rezultata moga rada s kolegama u Laboratoriju za ispitivanje materijala na Veleučilištu u Karlovcu.

Nakon višegodišnjeg iskustva u nastavi iz kolegija *Materijali II* kojeg sam nositelj na Veleučilištu u Karlovcu i kojeg izvodim zajedno s kolegom Tomislavom Božićem (dipl. ing.), odlučila sam se za izradu ovo nastavnog materijala, kako bi studentima olakšala rad i učenje iz ovog područja.

Isto tako, puno sam naučila od mog starijeg kolege, višeg predavača Nikole Soničkog (dipl. ing.), koji je bio nositelj kolegija *Materijali II* do odlaska u mirovinu i koji mi je ostavio podosta korisnih literaturnih izvora. Sve je to ugrađeno u ovaj nastavni materijal.

Posebno se zahvaljujem višoj laborantici Ani Fudurić (struč. spec. ing. stroj.) na zajedničkom radu u Laboratoriju za ispitivanje materijala.

Zahvaljujem svima koji su mi pomogli pri izradi ovog nastavnog materijala, a posebno recenzentima – višim predavačima: Tomislavu Božiću (dipl. ing.) i Marijanu Brozoviću (dipl. ing.), te dr. sc. Miljenku Mathu, redovitom profesoru u trajnom zvanju. Zahvaljujem također kolegama s Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, gdje pohađam poslijediplomski doktorski studij tehničkih znanosti, posebno mentoru prof. dr. sc. Goranu Cukoru.

Karlovac, studeni 2016.

Tihana Kostadin, mag. ing. stroj.

Sadržaj

1. UVOD	9
2. SISTEMATIZACIJA MATERIJALA	13
3. ČELICI	15
3.1. Uvodno o čelicima	15
3.2. Dobivanje čelika	17
3.3. Primjese i nemetalni uključci u čeliku	18
3.4. Legirni elementi u čeliku	19
3.5. Konstrukcijski čelici	22
3.5.1. Svojstva konstrukcijskih čelika	22
3.5.2. Opći konstrukcijski čelici	22
3.5.3. Čelici povišene čvrstoće	24
3.5.4. Čelici za cementiranje	27
3.5.5. Čelici za poboljšavanje	28
3.5.6. Čelici za nitriranje	30
3.5.7. Čelici za opruge	31
3.5.8. Čelici poboljšane rezljivosti – čelici za automate	32
3.5.9. Korozijski postojani čelici – nehrđajući čelici	32
3.5.10. Čelici za rad pri visokim temperaturama	38
3.5.11. Čelici za rad pri niskim temperaturama	42
3.5.12. Visokočvrsti čelici	43
3.6. Alatni čelici	45
3.6.1. Razvoj i podjela alatnih čelika	45
3.6.2. Svojstva alatnih čelika	46
3.6.3. Postupci toplinske obrade alatnih čelika	47
3.6.4. Alatni čelici za hladni rad	47
3.6.5. Alatni čelici za topli rad	48
3.6.6. Brzorezni čelici	49
3.6.7. Sinterirani alatni čelici	50
4. ŽELJEZNI LJEVOVI	51
4.1. Uvodno o željeznom lijevu	51
4.2. Čelični lijev	52
4.3. Bijeli tvrdi lijev	53
4.4. Sivi lijev	54
4.5. Nodularni (žilavi) lijev	55
4.6. Temper (kovkasti) lijev	58
Popis dijagrama, slika i tablica	61
Popis oznaka	63
Literatura	65

1. UVOD

Materijali su čvrste tvari od kojih je nešto izrađeno ili sastavljeno, kao što su na primjer razne konstrukcije.

Tehnički materijali su oni materijali od kojih se izrađuju tehnički proizvodi, a posjeduju kombinaciju povoljnih fizikalnih svojstava koja se nazivaju tehnička svojstva. [7]

Tvar koja posjeduje određena tehnička svojstva mora ispuniti još dva preduvjeta da postane tehnički materijal: mora se moći prerađivati, odnosno dovesti u željeni oblik (lijevanjem, oblikovanjem deformiranjem, obradom odvajanja čestica, zavarivanjem, sinteriranjem itd.); mora biti ekonomična odnosno pristupačna cijenom, jer ako je preskupa teško dolazi u primjenu.

Promatrajući povijest civilizacije, lako je uočiti da su pojedina razdoblja dobila ime upravo po materijalima; razvoj materijala kroz povijest, prikazan je u Tablici 1.1.

Tablica 1.1: Materijali kroz povijest

Razdoblje	Materijali
Kameno doba – 100000 do 4000 godina pr.Kr.	Kamen – alat i oružje izrađuju se od kamena
6000 godina pr.Kr.	Otkriveni su keramika i glina
8000 godina pr.Kr. – 2000 godina pr.Kr.	Pronađen je i obrađivan bakar (najstariji pronađeni metal); pronađeno je zlato
Brončano doba – oko 3000 godina pr.Kr.	Bronca
Željezno doba – oko 1000 godina pr.Kr. pa do danas	Željezo
19. i 20. stoljeće	Aluminij i aluminijske legure
19. i 20. stoljeće	Polimerni materijali
Danas	Kompozitni materijali, nanomaterijali

S vremenom su se materijali sve više usavršavali, odnosno ljudi su naučili mijenjati svojstva materijala, kako bi ih prilagodili sve složenijim zahtjevima. Promjena, u smislu poboljšanja svojstava materijala omogućila je realizaciju novih tehničkih rješenja, odnosno proizvoda. Kroz povijest je čovjek do znanja o materijalima dolazio isključivo empirijski, a tek u 19. stoljeću počinje se razvijati sustavno istraživanje, koje dovodi do utemeljenja interdisciplinarnе znanosti o materijalima, koja se ovom problematikom bavi na znanstvenoj osnovi.

Broj materijala, kao i njihova količina u stalnom su porastu, a novi materijali imaju odgovarajuća – željena svojstva, pa se sve više govori o kompozitnim materijalima, koji se dobivaju umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava, kako bi se dobili materijali takovih svojstava kakva nema niti jedna komponenta sama za sebe.

Danas se koriste i brojni drugi novi materijali: keramičke pjene (izuzetno lagan materijal s ćelijastom strukturom), ugljične pjene (grafitne i negrafitne), polimerne pjene (materijali s trodimenzionalnim ćelijama koje tvore saćastu građu), aerogelovi (materijali ćelijaste strukture nanometarskih dimenzija i vrlo visoke poroznosti).

Također se razvijaju biomimetički materijali i proizvodi, temeljem korištenja prirodnih sustava i struktura kao uzora za tehničko modeliranje. Na kraju ovog kratkog pregleda razvoja materijala, treba navesti i nanomaterijale, čije su dimenzije faza (čestica praška, zrna strukture ili proizvedenih slojeva) reda veličine od nekoliko do stotinjak nanometara.

Vrlo bitnu ulogu ima selekcija, dakle izbor materijala, koji je povezan s projektiranjem i konstruiranjem dijelova, kao i s izborom i razradom postupaka proizvodnje i montaže.

Kod konstruiranja proizvoda, uzimaju se u obzir sljedeća svojstva:

1. Tehnička svojstva: proizvodna, funkcijska i eksploatacijska svojstva.
2. Ekonomska svojstva: troškovi.
3. Društvena svojstva: ergonomska, ekološka, estetska svojstva.
4. Pravna svojstva.

Izbor materijala usko je povezan s razvojem novog proizvoda, no postoje i drugi razlozi za preispitivanjem vrste materijala koji se koristi, kao i načina proizvodnje, u svrhu ponovne izrade već konstruiranog proizvoda. Ti razlozi mogu biti: prednosti uvođenja novog materijala; poboljšanje uporabnih karakteristika proizvoda; promjena uvjeta rada u upotrebi; kvarovi u upotrebi, koji su uzrokovani materijalom; pojava novih propisa ili normi; smanjenje troškova.

Kod izbora materijala, postavljaju se određeni zahtjevi, a to su:

1. **Funkcionalnost** – osnovno svojstvo koje opisuje sljedeće zahtjeve: fizikalno-kemijska svojstva, mehanička svojstva, otpornost na trošenje, otpornost na djelovanje agresivnih medija.
2. **Tehnologičnost** – opisuje se preko svojstava livljivosti, rezljivosti, oblikovljivosti deformiranjem, zavarljivosti, toplinske obradljivosti.
3. **Raspoloživost i cijena materijala** – porijeklo pojedinog materijala, raspoložive vrste, kvaliteta materijala od pojedinih proizvođača, troškovi nabave.
4. **Standardiziranost** – prednost upotrebe materijala koji su propisani normama.
5. **Recikličnost materijala i ekologija** – obuhvaća mogućnost razgradnje i recikliranja, vezano za pojedini materijal, te svakako utjecaj na okoliš i na zdravlje ljudi; ovome se u posljednje vrijeme pridaje sve veća pažnja.
6. **Estetičnost** – boja, mogućnost lijepog oblikovanja i postizanja željenog stanja površine. [1]

Kod izbora materijala, danas se koriste klasične, kao i računalne podloge i pomagala.

Svojstva materijala koja su bitna za strojarske konstrukcije, mogu se općenito podijeliti na: mehanička, tehnološka, kemijska, fizikalna i eksploatacijska.

- **Tehnološka svojstva** pokazuju sposobnost materijala za obradu različitim postupcima.
- **Kemijska svojstva** su kemijski sastav i korozijska svojstva.

- **Fizikalna svojstva** su električna, magnetska, toplinska, optička, zatim gustoća, talište itd.
- **Eksplatacijska svojstva** pokazuju otpornost materijala u uporabi (na primjer otpornost na trošenje, na koroziju...).

Ipak, temeljna svojstva materijala s gledišta strojarstva su **mehanička svojstva**, budući da se na osnovi njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja.

Ispitivanja mehaničkih svojstava materijala mogu biti: statička (kratkotrajna i dugotrajna), dinamička (kratkotrajna i dugotrajna), kao i svojstva tvrdoće.

Statička kratkotrajna su: statički vlačni pokus, statički tlačni pokus i sl.; statička dugotrajna: ispitivanje puzanja materijala; dinamička kratkotrajna: ispitivanje udarnog rada loma (žilavosti) i dinamička dugotrajna: ispitivanje umora materijala – dinamičke izdržljivosti.

Tvrdoća materijala je jedno od najčešće ispitivanih svojstava materijala, a najviše se ispituje sljedećim metodama: Brinellova metoda, Vickersova metoda i Rockwellova metoda ispitivanja tvrdoće.

Za laboratorijska ispitivanja osnovnih mehaničkih svojstava materijala, koristi se odgovarajuća oprema. Tako na primjer za ispitivanje materijala na vlak, odnosno tlak ili savijanje, koriste se razne vrste kidalica, od kojih je jedna prikazana na Slici 1.1.

Mehanička svojstva materijala su, kao i sva ostala svojstva, posljedica mikrostrukturnog stanja materijala, koje se dobiva obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom. Tako se izborom materijala i odgovarajućeg tehnološkog postupka postiže ciljano strukturno stanje materijala, koje daje željena svojstva.

Za promatranje mikrostrukture čelika, potrebno je poznavanje metalografije, koja se bavi istraživanjem strukture metala i legura pomoću svjetlosnog (metalografskog) i elektronskih mikroskopa.

Makrostruktura je vidljiva golim okom ili uz malo povećanje, a mikrostruktura zahtijeva pomoć mikroskopa. Priprema uzorka za metalografsku analizu obuhvaća: izrezivanje uzorka, brušenje, umetanje malih uzoraka u smolu, fino brušenje, poliranje, odmašćivanje, nagrizanje površine uzorka, ispiranje uzorka i sušenje.

Na Slici 1.2 prikazan je mikroskop za promatranje mikrostrukture materijala u metalografskom laboratoriju.

Kemijski se sastav materijala utvrđuje spektroskopom prikazanim na Slici 1.3.



Slika 1.1: Kidalica za ispitivanje čvrstoće materijala [10]



Slika 1.2: Metalografski mikroskop [10]



Slika 1.3: Spektroskop za analizu kemijskog sastava materijala [10]

Prikazana oprema sastavni je dio Laboratorija za ispitivanje materijala, Veleučilišta u Karlovcu.

2. SISTEMATIZACIJA MATERIJALA

Postoji nekoliko pristupa sistematizaciji materijala, ali je najčešća i najprirodnija podjela prema sastavu, mikrostrukтури i načinu dobivanja:

1. Metali

1.1. Na bazi željeza

1.1.1. Čelici – konstrukcijski i alatni (za hladni rad, za topli rad i brzorezni čelici)

1.1.2. Željezni ljevovi – čelični ljev, bijeli tvrdi ljev, sivi ljev, nodularni (žilavi) ljev, temper (kovkasti) ljev

1.2. Neželjezni metali i legure – laki i obojeni metali i legure (legure Al, Cu, Ni, Ti, Mg, Zn, Co...)

2. Nemetali

2.1. Konstrukcijski polimerni materijali – plastomeri, elastomeri i duromeri

2.2. Konstrukcijska keramika (i stakla) – oksidna i neoksidna keramika

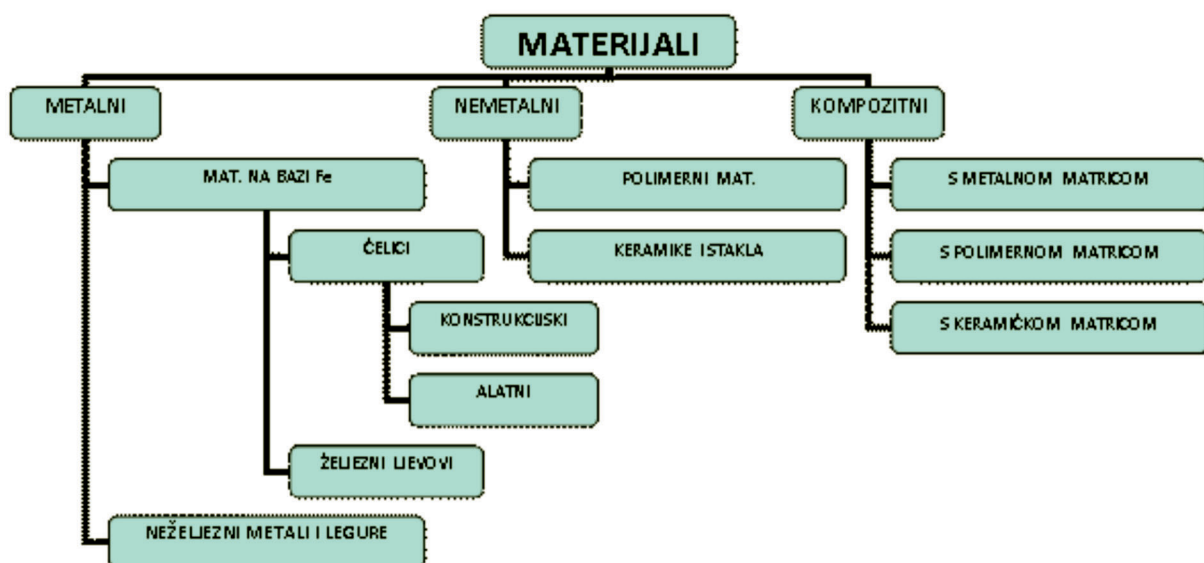
3. Kompoziti

3.1. Kompoziti s metalnom matricom

3.2. Kompoziti s polimernom matricom

3.3. Kompoziti s keramičkom matricom.

Blok shema podjele materijala prikazana je na Slici 2.1.



Slika 2.1: Sistematizacija materijala

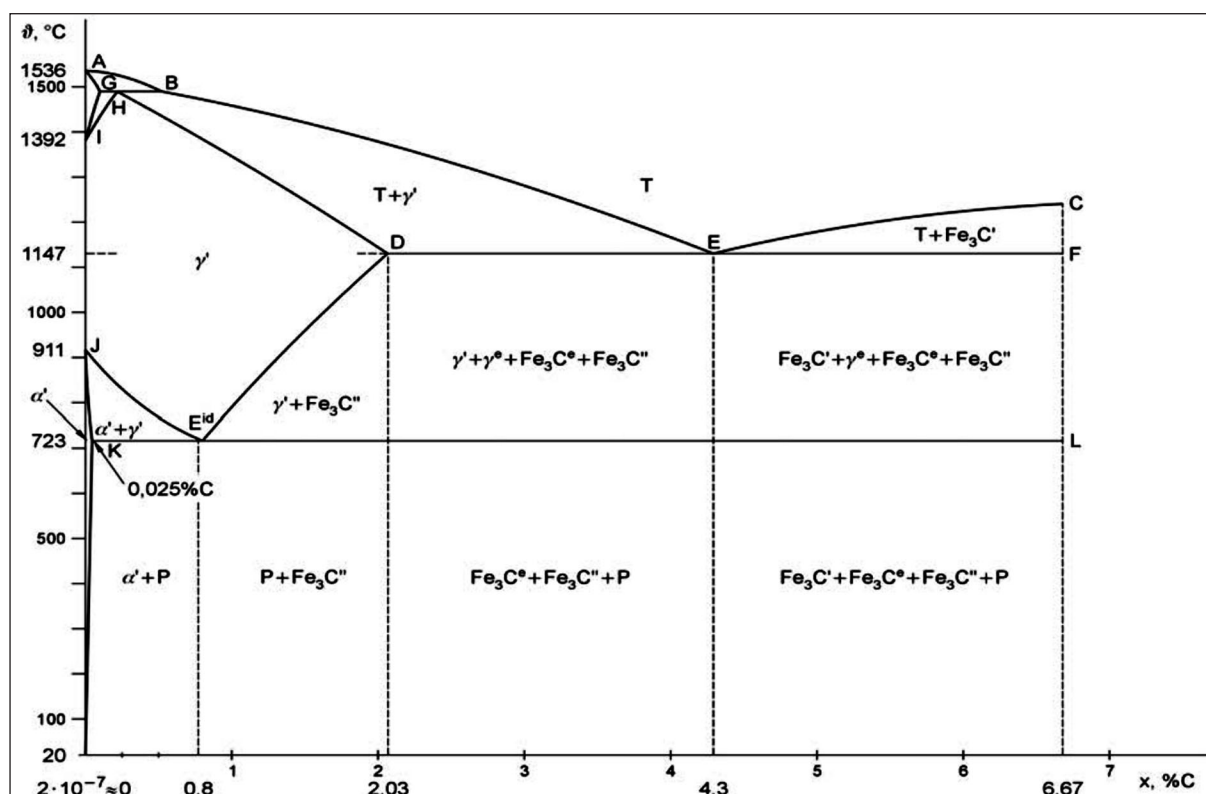
U ovom nastavnom materijalu, obrađuju se čelici i željezni ljevovi.

3. ČELICI

3.1. Uvodno o čelicima

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($\leq 2,03\%$ C), uz prisutne pratioce i nečistoće i uz eventualni dodatak jednog ili više legirnih elemenata.

Iz dijagrama željezo – ugljik za metastabilnu kristalizaciju, prikazanog u nastavku, vidi se prisustvo pojedinih faza i konstituenata pri određenoj temperaturi i postotku ugljika.



Dijagram 3.1: Dijagram stanja Fe-C za metastabilnu kristalizaciju

Pri metastabilnoj kristalizaciji, ugljik se izlučuje u obliku cementita. Na apscisi je postotak ugljika, koji se kreće od 0 do 6,67 %, upravo koliko iznosi koncentracija ugljika u željeznom karbidu ili cementitu (Fe_3C). Na ordinati je temperatura. Promatrati se može primarna kristalizacija, dokle god postoji talina, a nakon toga, kada se skrutne i posljednja kap taline, promatramo strukturne promjene u čvrstom stanju, što nazivamo sekundarnom kristalizacijom.

Pri stabilnoj kristalizaciji, ugljik se izlučuje kao grafit (100 % ugljik).

U Fe-C sustavu za metastabilnu kristalizaciju mogu se pojaviti sljedeće prave faze: Talina (T), Austenit (A), Ferit (F), Karbid (K ili Fe_3C).

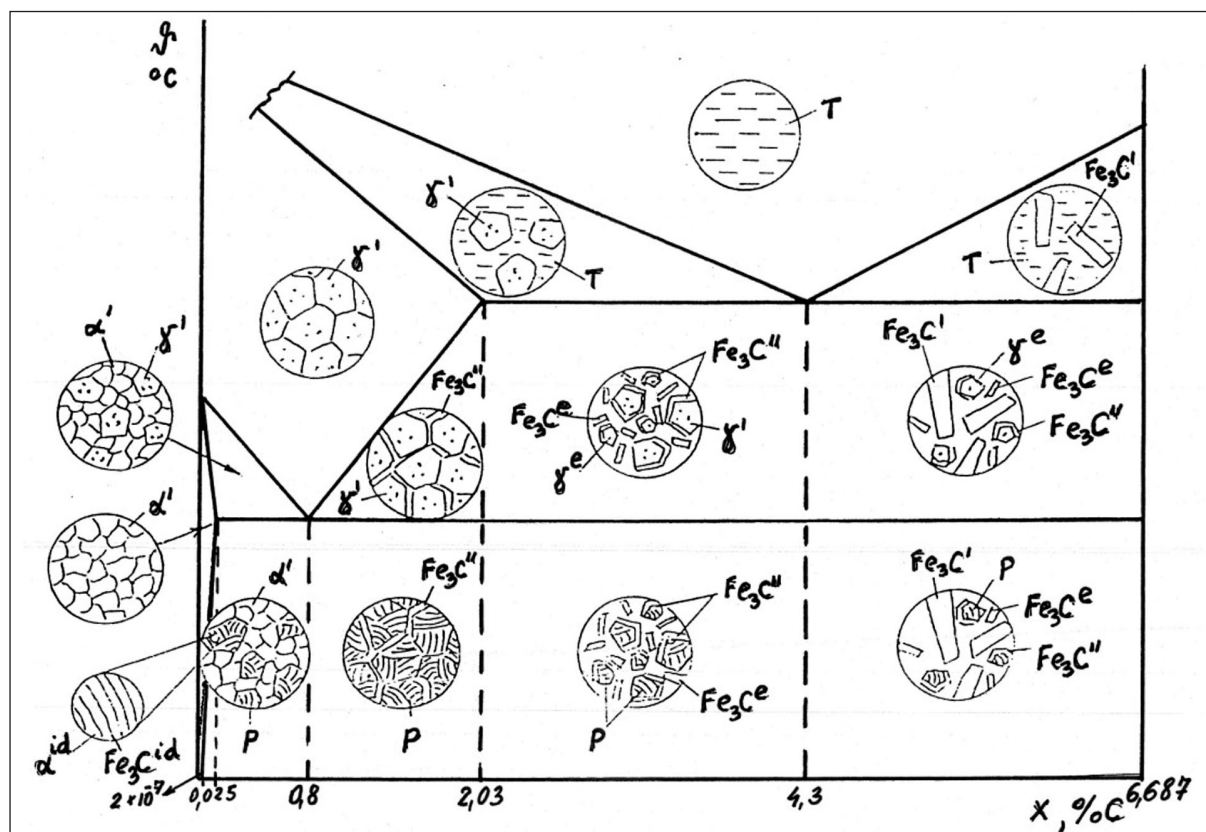
Ako se želi posebno naglasiti vrste faze po njezinu postanku, uvodi se pojam sastojaka faza ili konstituenata, koji se označavaju grčkim slovima: Primarni austenit (γ'), Eutektički austenit (γ^e), Delta ferit (δ), Primarni ferit (α), Eutektoidni ferit (α^{id}), Primarni karbid ($\text{Fe}_3\text{C}'$), Sekundarni karbid ($\text{Fe}_3\text{C}''$), Tercijarni karbid ($\text{Fe}_3\text{C}'''$), Eutektički karbid (Fe_3C^e) i Eutektoidni karbid (Fe_3C^{id}).

Svi konstituenti pravih faza jednakih su sastava i svojstava kao i prava faza, a međusobno se razlikuju po postanku, te po veličini i obliku čestica.

U metastabilnom Fe-C sustavu pojavljuju se i dvije pseudofaze („lažne faze“). To su: Ledeburit (L), $L = (\gamma^e + \text{Fe}_3\text{C}^e)$ i Perlit (P), $P = (\alpha^{id} + \text{Fe}_3\text{C}^{id})$.

Konstituenti koji su u sastavu pseudofaza to jest γ^e i Fe_3C^e (u ledeburitu) te α^{id} i Fe_3C^{id} (u perlitu) su vezani konstituenti, dok su svi ostali slobodni konstituenti.

Radi boljeg uočavanja slijeda pretvorbi u Fe-C dijagramu, (v. Dijagram 3.2) je shematski prikazana struktura u pojedinim poljima dijagrama.



Dijagram 3.2: Shematski prikaz struktura u Fe-C dijagramu stanja za metastabilnu kristalizaciju [7]

Eutektička koncentracija, odnosno legura je 4,3 % C, a eutektička temperatura je 1147 °C. Podjela legura je sljedeća: legura koja ima 4,3 % C je eutektička legura, legure koje imaju više od 4,3 % C su nadeutektičke legure, a legure koje imaju manje od 4,3 % C su podeutektičke legure.

Eutektoidna koncentracija, odnosno legura je koja ima 0,8 % C, a eutektoidna temperatura je 723 °C. Legure koje imaju manje od 2,03 % C, a više od 0,8 % C su nadeutektoidne legure, legure koje imaju manje od 0,8 % C su podeutektoidne legure.

Čelici i čelični ljevovi imaju koncentraciju ugljika do 2,03 % i to konstrukcijski čelici do 0,8 %, a alatni čelici od 0,8 % do 2,03 % ugljika. Željezni ljevovi su legure s više od 2,03 % ugljika.

Čelik je najvažniji konstrukcijski i alatni materijal u strojarstvu, što proizlazi iz njegovih svojstava. Naime, radi se o dobroj kombinaciji sljedećih svojstava – čvrstoće, žilavosti, rezljivosti, spojivosti, oblikovljivosti deformiranjem, mogućnosti promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom, obradom deformiranjem, a tu je i relativno niska cijena.

Čelik se nakon lijevanja taljevine u kalupe oblikuje postupcima deformiranja u željeni oblik poluproizvoda, kao što su limovi, trake, cijevi, profili i sl.

Prema kemijskom sastavu čelici mogu biti:

- zajamčenog ili nezajamčenog sastava;
- ugljični (nelegirani) i legirani;
- prema vrsti legiranih elemenata: Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Cr-Ni čelici...;
- prema kvaliteti, odnosno čistoći: obični (ukupno P i S max. 0,100 %), kvalitetni (P i S maksimalno po 0,045 %) i plemeniti (P i S maksimalno po 0,030 %).

Prema tipu mikrostrukture, čelici mogu biti: feritni, feritno-perlitni, perlitni, martenzitni, austenitni...

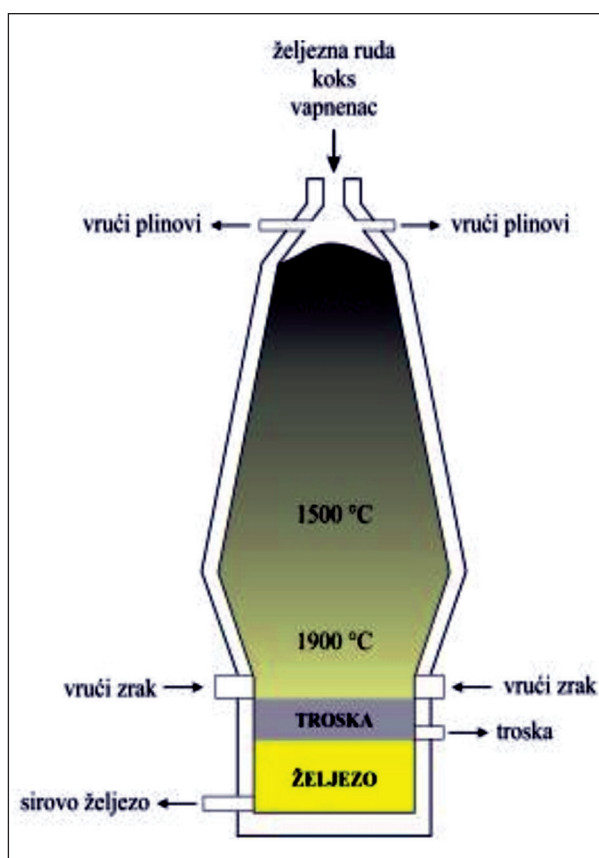
3.2. Dobivanje čelika

Kod proizvodnje sirovog željeza, željezna ruda se zagrijava u visokoj peći uz prisutnost ugljena (ugljika) i kisika. Ugljik reducira željeznu rudu u tekuće sirovo željezo, s ugljičnim monoksidom i ugljičnim dioksidom kao nusproizvodima. Vapnenac, koji se dodaje kako bi pomogao čišćenje nečistoća, topi se i nastaje tekuća šljaka. Sirovo željezo je zbog većeg sadržaja nečistoća i ugljika jako krhko i nije pogodno za obradu ili primjenu.

Proizvod visoke peći je bijelo ili sivo sirovo željezo. Bijelo sirovo željezo je osnovna sirovina za proizvodnju čelika, čeličnog lijeva i bijelog tvrdog lijeva, a sivo za dobivanje sivih ljevova. Budući da tekuće sirovo željezo sadrži velike količine ugljika, da bi se eliminirao višak ugljika i proizveo tekući čelik, u peć se upuhuje kisik.

Na Slici 3.1 prikazana je visoka peć.

Čelik se također proizvodi reciklažom starog željeza. Staro željezo se topi u električnim pećima, u kojima toplina električnog luka tali staro željezo. Mnoge legure se proizvode u elektropečima. Tekući čelik se direktno lijeva u kalupe da bi se proizveli konačni čelični ljevovi, a lijeva se i u oblike iz kojih se kasnije plastičnom obradom, kao što je valjanje i kovanje, proizvode limovi i otkivci. Čelik se također lijeva u velike ingote, ili se kontinuirano lijeva u pravilne oblike.



Slika 3.1: Visoka peć

Sirovo željezo, u osnovi legura željeza i ugljika, sadrži oko 3,5 % C, te stanovitu količinu silicija, mangana, fosfora, sumpora i u tragovima druge elemente. Vrlo je krhko, ne može se deformirati u hladnom niti vrućem stanju i neprikladno je za upotrebu. Zbog toga se sirovo željezo mora pročistiti (rafinirati), što se izvodi u različitim metalurškim pećima.

Za proizvodnju čelika bitno je smanjiti postotak ugljika ispod 2 %, odstraniti Si i Mn i svesti na najmanju mjeru sadržaj P i S. Također je potrebna dezoksidacija, a to je proces otklanjanja kisika tijekom proizvodnje.

Prema načinu pretaljivanja i stupnju dezoksidacije razlikuju se:

- a) nesmireni čelici;
- b) polusmireni i smireni čelici;
- c) posebno smireni čelici.

Nesmireni čelici skrućuju „nemirno”, jer jako razvijanje plinova dovodi do „kuhanja” rastaljenog metala. Tako se tijekom skrućivanja u kokili pojavljuju plinski mjehurići. Kako plinski mjehurići kompenziraju smanjenje volumena ingota tijekom hlađenja, tako nema pojava šupljina – lunkera. Plinski se mjehurići zatvaraju tijekom daljnje obrade, ako nisu oksidirali, a ako su oksidirali, onda ostaju sitne napukline koje izazivaju koncentraciju naprezanja. Potrebno je dodati Mn, koji veže sumpor i kisik u MnS, odnosno MnO, spojeve koji nisu opasni s obzirom na pojavu tzv. crvenog loma.

Smireni čelici dobivaju se tako da se u procesu dezoksidacije dodaje manja količina Si i Mn i drugih elemenata koji vežu kisik i stvaraju okside, koji se izdvajaju u trosku. U smirenim ingotima nema plinskih mjehurića i nije izražena segregacija, ali se u „glavi” ingota pojavljuju šupljine i nečistoće, a u „peti” ingota dendritična struktura nepovoljna za bilo kakvu daljnju obradu, pa ovaj dio ingota treba odrezati prije daljnjeg valjanja. Smireni čelici imaju homogenu mikrostrukturu, bolja mehanička svojstva i bolju zavarljivost, te su prikladniji za toplinsku obradu.

Kod posebno smirenih čelika se osim Mn i Si, dodaje još i silikokalcij (CaSi), kao i Al, koji veže preostali kisik u Al_2O_3 i dušik u AlN. Rezultat toga je čelik s vrlo niskim masenim udjelima nečistoća, visoke žilavosti i male osjetljivosti na krhki lom.

3.3. Primjese i nemetalni uključci u čeliku

Primjese u čeliku mogu biti elementi pratioci, skriveni i slučajni elementi. Prateće primjese su prisutne u svakom čeliku i njihove udjele treba svesti na najmanju moguću mjeru. Pratioci i nečistoće su: Si, Mn, N, P, S, te nemetalni uključci sulfidnog, oksidnog ili silikatnog tipa. Male količine Cu, Cr, Ni, As, Sn dolaze u čelik iz otpada i iz rude.

Dušik (N) je uglavnom nepoželjna primjesa, a njegov je maseni udio oko 0,01 do 0,03 %. Dušik je element koji povišuje granicu razvlačenja i čvrstoću, no jako smanjuje deformabilnost, kao i udarni rad loma. Prisutnost dušika izaziva pojavu starenja i to posebno kod hladno deformiranih čelika; rezultat je povišena čvrstoća i smanjena žilavost. Dodavanjem elemenata koji imaju veći afinitet prema dušiku od željeza (to su: Al, Ti, Nb i dr.), povlači se dušik iz čvrste otopine u nitride, pa čelik postaje otporan na starenje.

Fosfor (P) je nepoželjna primjesa u čeliku, čiji maseni udio treba biti manji od 0,06 %. Ovo je element koji čini sa željezom supstitucijski kristal mješanac. Povećanje masenog udjela fosfora uzrokuje pojavu krhkosti u hladnom stanju.

Kisik (O) je element čija prisutnost povisuje krhkost čelika. Dezoksidacijom čelika uklanja se veći dio kisika.

Mangan (Mn) je prateći element, čiji je maseni udio oko 0,2 do 0,8 % i uglavnom potječe iz rude ili iz feromangana. Dobar je dezoksidans, a na sebe veže sumpor, tvoreći kemijski spoj MnS.

Silicij (Si) je prateći element, čiji je maseni udio oko 0,2 do 0,5 % i potječe iz rude ili iz ferossilicija.

Sumpor (S) je nepoželjna primjesa, a dolazi uglavnom iz rude, ili iz produkata izgaranja (SO_2). Dopusćeni maseni udio sumpora je maksimalno 0,05 %. Sumpor sa željezom tvori FeS, koji je nepoželjan i u mikrostrukturi čelika se pojavljuje po granicama zrna. Međutim, ponekad viši maseni udio sumpora može imati i pozitivan utjecaj i to ako se radi o čelicima koji trebaju imati povišenu rezljivost.

Vodik (H) je element koji sa željezom čini intersticijske mješance. Vodik uzrokuje pad žilavosti, mada čvrstoća ne raste, jer iz atomarnog stanja prelazi u molekularni u obliku sitnih mjehurića, a ta se pojava naziva „vodikova krhkost”.

Količina, vrsta i raspored nemetalnih uključaka određuju svojstva oblikovljivosti i otpornosti na lom kod čelika. Uključci mogu biti oksidni, sulfidni ili silikatni. Utvrđivanje prisutnosti uključaka je relativno teško, a uglavnom se mogu podijeliti na okrugle, poligonalne i izdužene. U njihovoj blizini dolazi do koncentracije naprezanja pri djelovanju vanjskog opterećenja. Prisutnost uključaka smanjuje žilavost i dovodi do izrazite anizotropnosti svojstava čvrstoće i duktilnosti čelika.

3.4. Legirni elementi u čeliku

Legirani čelik sadrži osim željeza i ugljika, jedan ili više legirnih elemenata, a legiranjem se mijenjaju svojstva čelika. Dakle, čelik se legira s određenom količinom nekog elementa, kako bi se dobilo traženo svojstvo, ili pak kombinacija svojstava, ali se neminovno legiranjem neka svojstva i pogoršavaju.

Legirni elementi u čeliku, promatrajući njihov afinitet prema ugljiku mogu biti:

- karbidotvorci (krom, molibden, niob, tantal, titan, vanadij i volfram) i
- nekarbidotvorci (mangan, nikal i kobalt).

Ako se promatra utjecaj legirnih elemenata na dijagram stanja željezo – ugljik, tada legirne elemente dijelimo na:

- gamagene elemente koji proširuju područje austenita (mangan, nikal, kobalt) i
- alfa-gene elemente koji proširuju područje ferita (krom, molibden, vanadij, volfram).

U skladu s europskom normom, čelik je legiran ako sadrži jedan ili više elemenata, čiji maseni udio prelazi vrijednosti iz Tablice 3.1.

Tablica 3.1: Najviši dopušteni sadržaji legirnih elemenata u nelegiranim čelicima prema EN 10020

Legirni element	Granični maseni udio, %	Legirni element	Granični maseni udio, %
Aluminij (Al)	0,10	Niobij (Nb)	0,05
Bakar (Cu)	0,40	Olovo (Pb)	0,40
Bizmut (Bi)	0,10	Selen (Se)	0,10
Bor (B)	0,0008	Silicij (Si)	0,50
Cirkonij (Zr)	0,05	Telur (Te)	0,10
Kobalt (Co)	0,10	Titan (Ti)	0,05
Krom (Cr)	0,30	Vanadij (V)	0,10
Mangan (Mn)	1,60	Volfram (W)	0,05
Molibden (Mo)	0,08	Rijetke zemlje – lantanidi	0,05
Nikl (Ni)	0,30	Ostali elementi (osim C, P, S, N, O)	po 0,05

Gruba podjela čelika prema masenim udjelima legirnih elemenata je na:

- niskolegirane (s ukupnim udjelom legirnih elemenata do 5 %) i
- visokolegirane (s masenim udjelom barem jednog legirnog elementa više od 5 %).

Legirni elementi se u čelicima mogu pojaviti: rastvoreni u BCC rešetki (α – Fe) ili u FCC rešetki (γ – Fe); kao spojevi sa željezom ili međusobno (karbidi i intermetalni spojevi) i kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi i fosfidi).

Ugljik (C) zapravo „pripada” čeliku, pa se obično i ne smatra legirnim elementom, a za veći broj čelika je ugljik najvažniji element, koji utječe na svojstva čelika. Maseni udio ugljika u čeliku je do 2,03 %. Ugljik u nekaljenim čelicima povišuje čvrstoću i granicu razvlačenja, a snižava duktilnost. U slučaju kaljenja čelika, ugljik u svim čelicima osigurava zaka-ljivost (visinu tvrdoće gašenja).

Aluminij (Al) se najviše koristi kao element za dezoksidaciju u metalurškoj preradi čelika, a također je učinkovito sredstvo za denitriranje (stvara spoj AlN). Nadalje, aluminij povećava otpornost na koroziju pri povišenim i visokim temperaturama.

Kobalt (Co) proširuje austenitno područje. Usporava rast zrna pri povišenim temperaturama, omogućava postojanost mikrostrukture, te povišuje čvrstoću pri povišenim temperaturama, pa se naročito koristi kod brzoreznih čelika.

Krom (Cr) je jak karbidotvorac, a karbidi povišuju otpornost na pritisak i otpornost na abrazijsko trošenje. Krom povišuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita (M_s = martensite start). Krom proširuje područje ferita (pa je tzv. alfa-fageni element). Legiranje kromom utječe na sklonost krhkosti popuštanja, koja se izbjegava legiranjem s molibdenom. Također, krom u čeliku djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti.

Mangan (Mn) djeluje dezoksidirajuće, a također na sebe veže sumpor. Kod konstrukcijskih čelika povisuje granicu razvlačenja i povoljno djeluje na žilavost. Mangan znatno poboljšava prokaljivost čelika. Mangan proširuje austenitno područje (pa je to tzv. gamageni element), a čelici s više od 12 % mangana su austenitne mikrostrukture i pri normalnoj temperaturi.

Molibden (Mo) se najčešće dodaje zajedno s drugim legirnim elementima. Ovaj element utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, te granice puzanja. Molibden povećava prokaljivost čelika, a sprječava pojavu krhkosti kod popuštanja. Uz prisutnost kroma, povećava otpornost na koroziju i to osobito na pitting koroziju.

Nikal (Ni) je gamageni element, pa su austenitni nehrđajući čelici uobičajeno legirani s niklom. Nikal se tako najviše koristi kao legirni element kod čelika posebnih svojstava – nehrđajući i korozijski postojani, zatim čelici za rad pri povišenim i niskim temperaturama, vatrootporni čelici. Nikal povisuje žilavost konstrukcijskih čelika. Zbog ekonomskih razloga, odnosno visoke cijene, nikal se gotovo uvijek dodaje u kombinaciji s drugim legirnim elementima.

Silicij (Si) je jak dezoksidator, povisuje čvrstoću i otpornost na trošenje, te granicu razvlačenja, pa je zbog toga koristan legirni element za čelike koji se koriste za izradu opruga. Silicij povisuje vatrootpornost i njime se zato legiraju vatrootporni čelici. Kod toplinske obrade, čelici legirani sa silicijem pokazuju sklonost razugljičenju površine, dok pri cementiranju silicij otežava difuziju ugljika u čelik.

Titan (Ti) ima jaki afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu. Titan je najjači karbidotvorac.

Vanadij (V) je jak karbidotvorac i na taj način povisuje tvrdoću i otpornost na trošenje. Vanadij usitnjava primarno austenitno zрно. Potreban je u brzoreznim čelicima, alatnim čelicima za rad pri povišenim temperaturama, te u konstrukcijskim čelicima za trajni rad pri povišenim temperaturama.

Volfram (W) je jak karbidotvorac, tvori vrlo tvrde i toplinski postojane karbide. Legiranje volframom omogućava povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Upravo zbog visoke otpornosti na trošenje svojih karbida, posebno je potreban legirajući element za brzorezne čelike.

Ostali legirni elementi su: bakar (Cu), bor (B), niobij (Nb), tantal (Ta), olovo (Pb).

Na svojstva čelika bitno utječe maseni udio ugljika, koji je osnovni i najutjecajniji element u čelicima. Porastom masenog udjela ugljika smanjuje se sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, a raste zakaljivost. Zato većina konstrukcijskih čelika sadrži oko 0,6 do 0,8 % ugljika.

Na svojstva čelika također utječe maseni udio pratioca i nečistoća, te vrsta i udio legirnih elemenata, koji omogućavaju postizanje posebnih traženih svojstava.

Temeljna svojstva čelika određena su također mikrostrukturom i stanjem, kao i oblikom i dimenzijama proizvoda.

3.5. Konstrukcijski čelici

3.5.1. Svojstva konstrukcijskih čelika

Konstrukcijski čelici primjenjuju se za tipične konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja, koji obavljaju neku funkciju. Od konstrukcijskih čelika se traže sljedeća svojstva [1]:

1. **Mehanička svojstva** – visoka granica razvlačenja (elastičnosti) povezana s dovoljnom plastičnom deformabilnošću, dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama, dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama i dovoljna dinamička izdržljivost

2. **Otpornost na trošenje** – znači što manji gubitak mase, odnosno što manju promjenu stanja površine zbog međusobnog djelovanja dijelova u dodiru.

3. **Otpornost na koroziju** – dobra korozijska postojanost u atmosferi ili u agresivnim medijima, kao i otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama.

4. **Tehnološka svojstva** – rezljivost, zavarljivost, oblikovljivost.

Dobro poznavanje svojstava karakterističnih za pojedinu skupinu čelika je svakako preduvjet za njihovu pravilnu primjenu.

Ovdje će biti obrađeni sljedeći konstrukcijski čelici:

- Opći konstrukcijski čelici (za nosive konstrukcije i za strojogradnju);
- Čelici povišene čvrstoće (normalizirani sitnozrnati i poboljšani sitnozrnati);
- Čelici za cementiranje;
- Čelici za poboljšavanje (čelici za površinsko kaljenje i čelici za velike otkovke);
- Čelici za nitriranje;
- Čelici za opruge;
- Čelici poboljšane rezljivosti;
- Korozijski postojani čelici – nehrđajući čelici (feritni, superferitni, martenzitno-feritni, martenzitni, mekomartenzitni, austenitni i austenitno-feritni s $\leq 10\%$ δ -ferita, austenitni ELC, austenitni legirani dušikom, austenitno feritni – duplex čelici);
- Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama (vatrootporni čelici i čelici za ventile motora);
- Čelici za rad pri niskim temperaturama;
- Visokočvrsti čelici (niskolegirani niskopopušteni, visokolegirani Cr-Mo-V visokopopušteni, korozijski postojani precipitacijski očvršnuti, termomehanički obrađeni, hladno oblikovani nelegirani ili niskolegirani, čelici *maraging*).

3.5.2. Opći konstrukcijski čelici

Opći konstrukcijski čelici najviše se koriste i to za nosive konstrukcije u visokogradnji, mostogradnji, brodogradnji, gradnji vozila, gradnji spremnika i slično.

Mehanička svojstva koja se traže od ovih čelika su:

- visoka granica razvlačenja – elastičnosti (R_e);
- visoka čvrstoća (vlačna, tlačna, savojna) – to znači da je poželjno da je površina ispod dijagrama „ σ / ϵ ” što veća;

- visoka žilavost – udarni rad loma pri 20 °C i što niža „prijelazna temperatura”.

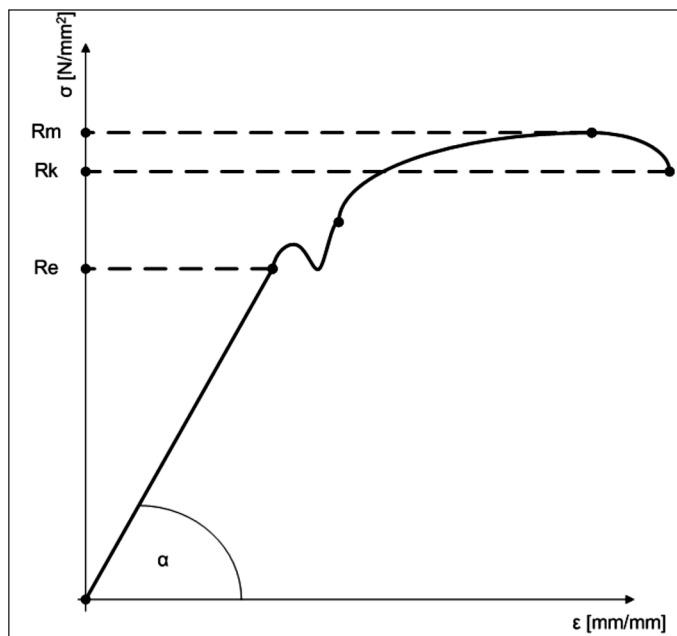
Prijelazna temperatura je temperatura koja odvaja područje visokog udarnog rada loma od područja niskih vrijednosti.

Slijedi prikaz dijagrama „naprezanje – deformacija” za opći konstrukcijski čelik (v. Dijagram 3.3).

U dijagramu je na apscisi deformacija, odnosno istezanje ε [%], a na ordinati naprezanje σ [N/mm²]. Prikazane su točke: granica razvlačenja – elastičnosti (R_e), vlačna čvrstoća (R_m) i granica loma – kidanja (R_k).

Granica elastičnosti dijeli elastično od plastičnog područja. Naime, u području elastične deformacije, materijal se nakon prestanka djelovanja opterećenja trajno ne deformira, dok je plastična deformacija trajna.

U skladu s Hookeovim zakonom, modul elastičnosti (Youngov modul, E) je omjer naprezanja i deformacije, odnosno tangens kuta α , prikazanog u dijagramu.



Dijagram 3.3: Dijagram „naprezanje – deformacija”

Osnovna formula koja povezuje gore spomenute veličine je:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

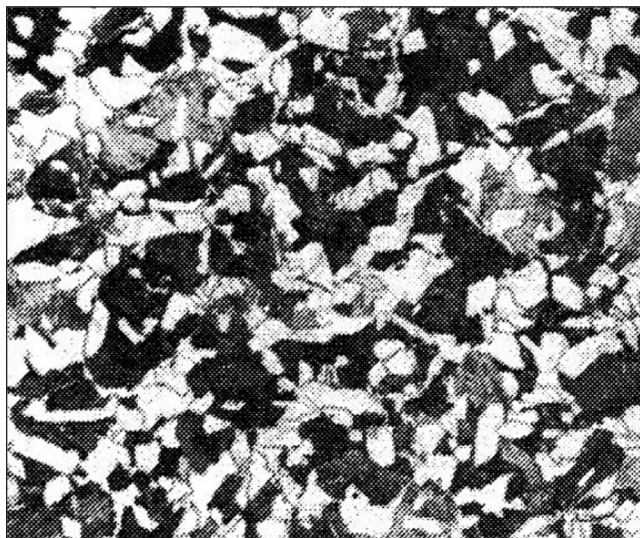
Gore prikazani dijagram također može biti i dijagram „sila / produljenje” ($F / \Delta l$). Naime, kako bi iz sile dobili naprezanje, odnosno čvrstoću, potrebno je uzeti u obzir površinu poprečnog presjeka ispitnog uzorka $\left(\sigma = \frac{F}{s}\right)$.

Na Slici 3.2 je prikaz mikrostrukure općeg konstrukcijskog čelika. Svjetliji dijelovi predstavljaju ferit, a tamniji perlit.

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije

Od ove podskupine čelika se traži dovoljno visoka nosivost i sigurnost, a također je poželjno da ovi čelici budu dovoljno čvrsti kod rada pri povišenim temperaturama, zatim dovoljno otporni na trošenje i dovoljno dinamički izdržljivi.

Od tehnoloških svojstava bitna je zavarljivost.



Slika 3.2: Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika [11]

Pokazatelj dobre zavarljivosti je što niža vrijednost ugljičnog ekvivalenta – C_e , koji se računa prema formuli:

$$C_e = \% C + \frac{\%M_n}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10}.$$

Zavarljivost je bolja, što je niži postotak ugljika i što je niži stupanj legiranosti.

Prihvatljivo je da je vrijednost $C_e < 0,4$; jer u slučaju većih iznosa ugljičnog ekvivalenta, kod zavarivanja je potrebno predgrijavanje materijala, pa je poslije i ohlađivanje sporije.

Kemijski sastav ovih čelika nije propisan, ali su zajamčena mehanička svojstva. Ovi čelici nisu predviđeni za toplinsku obradu, upravo zbog nezajamčenog kemijskog sastava, kao i višeg masenog udjela nečistoća nego kod ostalih čelika.

Temperature uporabe su normalne i snižene (od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$), a kod sniženih temperatura, povećava se opasnost od krhkog loma.

Norme propisuju sljedeće karakteristike: orijentacijski kemijski sastav; mehanička svojstva (R_e , R_m , A_5 , KV); tehnološka svojstva.

Primjena: konstrukcije u građevinarstvu; spremnici tekućina i plinova; dijelovi vozila; kostur i oplata brodova.

Čelici za strojogradnju

Čelici za strojogradnju se primjenjuju za one strojne dijelove koji se gibaju u odnosu na druge dijelove, ili pak prenose sile i momente.

Ovi su čelici nešto slabije zavarljivi, zato što imaju viši maseni udio ugljika, a također su više čvrstoće i niže istezljivosti od općih konstrukcijskih čelika.

Primjeri općih konstrukcijskih čelika: S185 (Č000), S235JRG2 (Č0370), S235JRG1 (Č0371), S235J0 (Č0362), S275JR (Č0445V), S275J0 (Č0482), S355JRG2 (Č0561), E295 (Č0545), E335 (Č0645), E360 (Č0745).

Oznake su navedene prema EN (Europskoj normi), dok je u zagradi oznaka prema staroj HRN (Hrvatskoj normi).

3.5.3. Čelici povišene čvrstoće

Ova skupina konstrukcijskih čelika ima više vrijednosti granice razvlačenja (elastičnosti) i vlačne čvrstoće.

Primjenom ovih čelika se smanjuju nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuju se masa i volumen konstrukcije, a to ujedno dovodi do smanjenja ukupnih troškova materijala.

Kod razvoja ove vrste čelika zadržava se tzv. plastična rezerva, pa u slučaju preopterećenja prije dolazi do plastične deformacije, a ne do iznenadnog loma.

Kod uporabe čelika povišene ili visoke čvrstoće, treba uzeti u obzir sljedeće:

- obratiti pažnju na problem krutosti, odnosno stabilnosti konstrukcije, jer kod nekih tlačno opterećenih konstrukcija tankih presjeka može se pojaviti povećano izvijanje, a kod savijanja veliki progib;
- kod dimenzioniranja presjeka voditi računa o činjenici da korozija dodatno smanjuje debljinu stijenke, tako da se nosivost presjeka smanjuje;

- porastom granice razvlačenja pada deformabilnost, a raste osjetljivost prema pojavi krhkog loma;
- čelici iz ove skupine su osjetljivi na urezno djelovanje, pa treba biti oprezan u uvjetima promjenjivog dinamičkog opterećenja.

Postizanje većih vrijednosti čvrstoće kod čelika ovisi o mogućnostima modificiranja mikrostrukture čelika, ali svi mehanizmi očvršnuća se temelje na otežavanju gibanja dislokacija nastajanjem zapreka.

Naime, pokretljivost dislokacija snižava čvrstoću, ali također omogućava trajnu deformaciju metala; zato ako se želi povišiti granica elastičnosti i vlačna čvrstoća, treba otežati gibanje dislokacija, ali ih ne i potpuno blokirati.

Otežavanje gibanja dislokacija ostvaruje se zaprekama, koje ipak ne smiju u potpunosti onemogućiti njihovo gibanje, jer bi to dovelo do krhkog loma.

Osnovni mehanizmi očvršnuća – zakoni povišenja granice elastičnosti, navedeni su u nastavku.

Očvršnuće kristalima mješancima (očvršnuće legiranjem) – zapreke su otopljeni strani atomi u rešetki željeza, koji čine supstitucijske ili intersticijske kristale mješance; od svih mehanizama očvršnuća, ovaj daje najmanje efekte – rezultat su točkaste zapreke. Kod ovog mehanizma potrebno je dodati veliki postotak legiranih elemenata, za jače očvršćivanje, što nije ekonomski prihvatljivo.

Očvršnuće martenzitnom transformacijom – transformacija austenita u martenzit kod kaljenja, a time se povisuju tvrdoća i čvrstoća, ali padaju žilavost i istezljivost, pa je potrebno provesti postupak popuštanja – rezultat su točkaste zapreke.

Očvršnuće uslijed unošenja novih dislokacija (hladnom deformacijom) koji se temelji na povećanju gustoće dislokacija koje otežavaju gibanje postojećim dislokacijama – što je viši stupanj deformacije, to će biti viša granica elastičnosti, jer raste gustoća dislokacija, a pri tom se smanjuje žilavost – rezultat su linijske zapreke.

Očvršnuće putem granica zrna (usitnjenjem zrna) – zapreke gibanju dislokacija čine velikokutne granice zrna; u većini slučajeva je povoljnije što je sitnije zrno. Ukoliko granica zrna djeluje kao polupropusna opna, biti će vjerojatnije da je jedno od susjednih zrna povoljno orijentirano, što su zrna sitnija. Ovaj se mehanizam kombinira s ostalim mehanizmima očvršnuća, a posebno je važan, zato što jedini i povisuje granicu elastičnosti i istodobno snižava prijelaznu temperaturu – rezultat su površinske zapreke.

Precipitacijsko očvršnuće – radi se o mehanizmu kojim se stvaraju zapreke karbidnog ili nitridnog karaktera i/ili karaktera intermetalnog spoja – rezultat su prostorne zapreke.

Konačno možemo zaključiti da se negativan učinak svih mehanizama očvršnuća može nadomjestiti usitnjenjem zrna.

Normalizirani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće

Ovi čelici imaju sitniju feritno-perlitnu mikrostrukturu, te dovoljno dobru zavarljivost. Usitnjenje zrna postiže se uz dodatak aluminija i uz dodatak disperzoidnih elemenata, kao što su Nb, V i Ti. Cilj je da se navedeni elementi spoje s ugljikom i dušikom u karbide, nitride ili karbonitride i tako pojačaju djelovanje AlN.

Sa povećanjem udjela ugljika, može se postići visoka čvrstoća, ali time pada zavarljivost.

Na Slici 3.3 je mikrostruktura sitnozrnatog čelika.

Čelici povišene čvrstoće uglavnom su sitnozrnati mikrolegirani i u literaturi se često pojavljuje engleska skraćenica **HSLA** (**H**igh **S**trength **L**ow **A**lloyed), što znači visokočvrsti niskolegirani čelici.

Povišenje vrijednosti granice elastičnosti ostvaruje se otežavanjem gibanja dislokacija putem zapreka.

Ovi čelici nisu osjetljivi na krhki lom, a imaju nisku prijelaznu temperaturu, dok je dobra zavarljivost osigurana niskim masenim udjelom ugljika ($< 0,2 \text{ \% C}$).

Kemijski sastav ovih čelika nije propisan. Čelici uz Mn i Ni sadrže još i Cr, Mo, Cu, Nb, V, Ti.

Klasifikacija se provodi na osnovi vrijednosti granice razvlačenja, područja radnih temperatura i na osnovi vrijednosti udarnog rada loma pri sniženim temperaturama.

Norme propisuju sljedeće vrijednosti mehaničkih svojstava: $R_{p0,2}$; R_m ; A_5 i KV .

Primjena: kuglasti i valjkasti spremnici za gradski plin; rezervoari za transport tekućih plinova; potpornji *off shore* platformi za eksploataciju nafte i plina; mostovi i vijadukti; postolja vozila; dijelovi građevinskih strojeva i dr.

Primjeri sitnozrnatih normaliziranih čelika: S255N (Č R0250), P275N (Č R0280), P315N (Č R0310), P355N (Č R0350), S380NL1 (Č R0380).

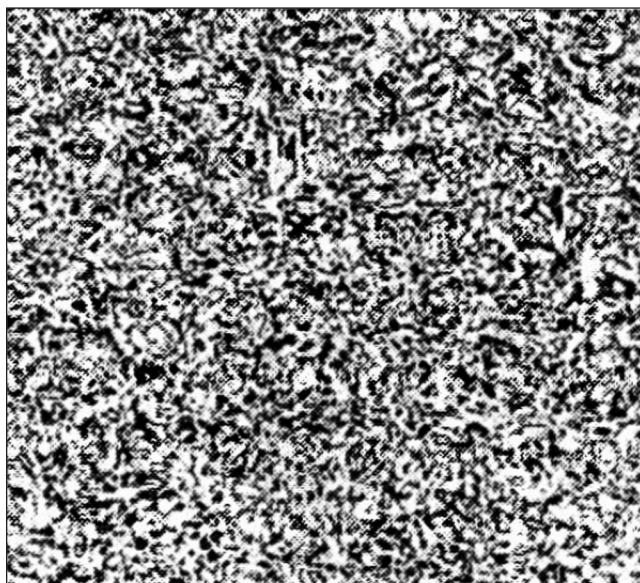
Poboljšani sitnozrnati čelici

Ovi čelici sadrže manje od $0,2 \text{ \% C}$, radi posebno dobre zavarljivosti i razvijeni su u III etapi razvoja nelegiranih čelika za nosive konstrukcije.

Niskougljični martenzit je najpogodnija mikrostruktura za postizanje izvanrednih svojstava čvrstoće i žilavosti. Mikrolegiranjem se povišuje temperatura M_s (oko $400 \text{ }^\circ\text{C}$), pa kod hlađenja dolazi do poboljšavanja samopopuštanjem martenzita u površinskim slojevima toplinom jezgre, čime je poboljšana žilavost čelika.

Pri koncipiranju sastava ove vrste čelika, posebno se vodilo računa o sljedećem:

- o što nižem $\text{\% C}$ radi bolje zavarljivost;
- o makrolegiranju koje će omogućiti prokaljivost do barem $90 \text{ \%}$ martenzita i/ili bainita u jezgri;
- o tome da se postigne niskougljični martenzit i/ili donji bainit; nakon zavarivanja trebaju se ostvariti jednaka svojstva zone utjecaja topline, kao i osnovnog materijala;
- o sadržaju legiranih elemenata koji će omogućiti sigurno izbjegavanje ferita hlađenjem na zraku;
- o dodacima disperzoidnih elemenata koji će osigurati sitno zрно.



Slika 3.3: Feritno-perlitna mikrostruktura sitnozrnatog čelika [11]

Mehanizmi očvrnuća koji sudjeluju kod očvrnuća ove skupine čelika su: stvaranje kristala mješanaca, unošenje novih dislokacija, precipitacijsko očvrnuće i usitnjenje zrna.

Primjena: kuglasti spremnici za plinove; mostovi; dijelovi buldožera; šasije vozila i vagoni za teški transport; kućišta i rotori vodnih turbina; dijelovi brodova; cjevovodi i dr.

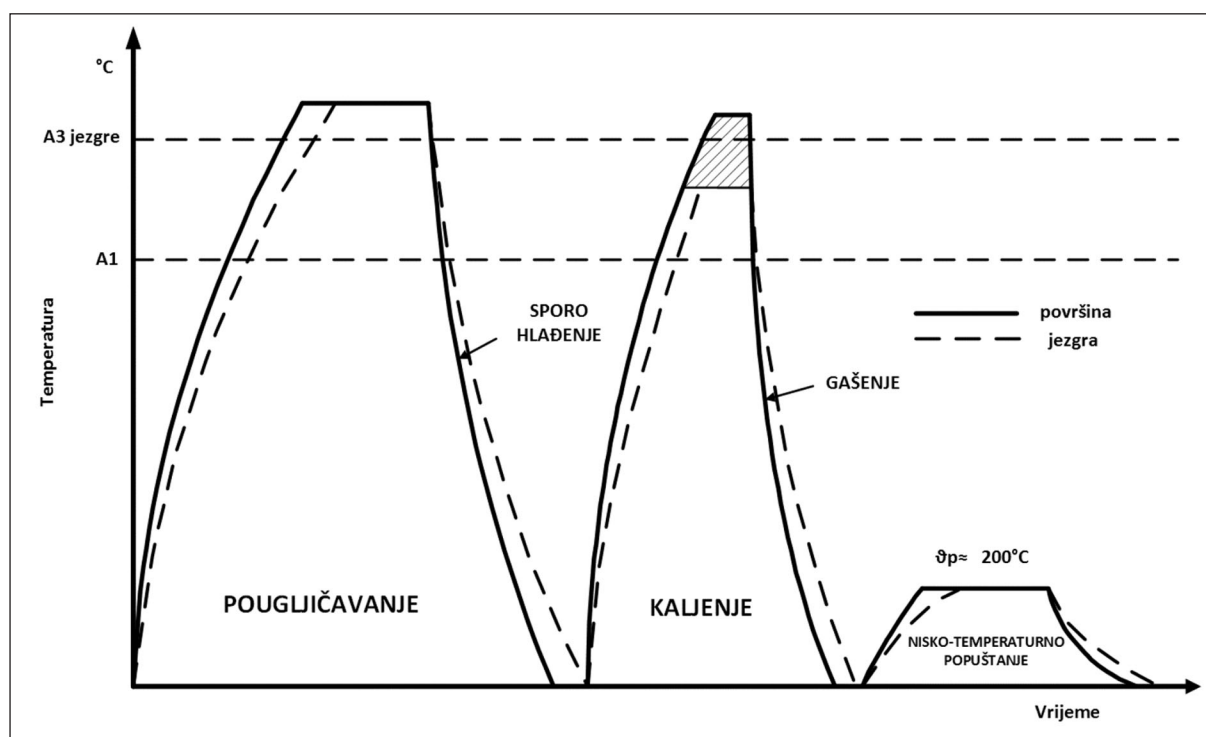
3.5.4. Čelici za cementiranje

U ovu skupinu spadaju niskougljični ($< 0,25\% \text{ C}$), nelegirani i niskolegirani čelici, zajamčenog sastava. Prema masenom udjelu nečistoća spadaju u kvalitetne i plemenite čelike.

To su konstrukcijski čelici kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougličava rubni sloj, pa se nakon toga kale, kako bi se postigla visoka otpornost na trošenje površinskih slojeva, a istovremeno i povišena žilavost niskougljične jezgre. S obzirom na činjenicu da niskougljični čelici s $0,1$ do $0,2\% \text{ C}$ nisu konvencionalno zakaljivi, treba im u cilju zakaljivanja i postizanja povišene otpornosti na trošenje povisiti sadržaj ugljika u rubnim slojevima na oko $0,8$ do $0,9\%$.

U toplinskoj obradi čelika, postupci pougličavanja i kaljenja pougličanog ruba, nazivaju se **cementiranje**.

Cementiranje se, dakle, sastoji od: pougličavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja, što je prikazano na Dijagramu 3.4.



Dijagram 3.4: Postupak cementiranja čelika [6]

Nakon cementiranja nepougličena jezgra ostaje feritno perlitna, ako proizvod nije prokaljen, odnosno postaje niskougljično-martenzitna u slučaju prokaljivanja.

Zaključak: nakon postupka cementiranja, površinski slojevi su tvrdi (visokougljični martenzit) i otporni na trošenje, a jezgra je otporna na dinamička udarna opterećenja, tj. žilava (feritno-perlitna mikrostruktura).

Postupak pougljičavanja provodi se u sredstvu koje je u stanju na temperaturi austenitizacije čelika (900 do 930 °C) predati čeliku ugljik. Koncentracija ugljika u površinskom sloju nakon pougljičavanja obično je 0,7 do 0,8 % ugljika – eutektoidna koncentracija. Sredstva za pougljičavanje mogu biti: kruta (granulati se sastoje od smjese drvenog ugljena kao nositelja ugljika, aktivatora BaCO_3 i veziva), tekuća (rastaljene soli kalijeva i natrijeva cijanida KCN odnosno NaCN i odgovarajućih aktivatora), plinovita (plinske atmosfere koje sadrže spojeve ugljika: CO, CH_4 , itd.) i plazmatična (ionizirani plinovi). Ovisno o trajanju pougljičavanja dobit će se odgovarajuća dubina pougljičavanja i ona će biti tim veća, što je trajanje pougljičavanja dulje. Naime, dubina pougljičavanja je u funkciji temperature i vremena pougljičavanja.

Zbog svega navedenog, čelici iz ove skupine se primjenjuju za one dijelove koji moraju istovremeno biti otporni na trošenje i podnositi dinamička opterećenja. S obzirom da jezgra sadrži mali postotak ugljika, tako će i tvrdoća biti niska, a prema površini se s porastom postotka ugljika tvrdoća povisuje do maksimalno pozitivnih vrijednosti.

To se vidi iz Burnsovog dijagrama, koji je prikazan u nastavku (v. Dijagram 3.5).

S obzirom da je otpornost na trošenje cementiranog sloja približno jednaka za sve čelike, zaključujemo da su za izbor čelika odlučujuća mehanička svojstva jezgre.

Glavne vrste čelika za cementiranje su:

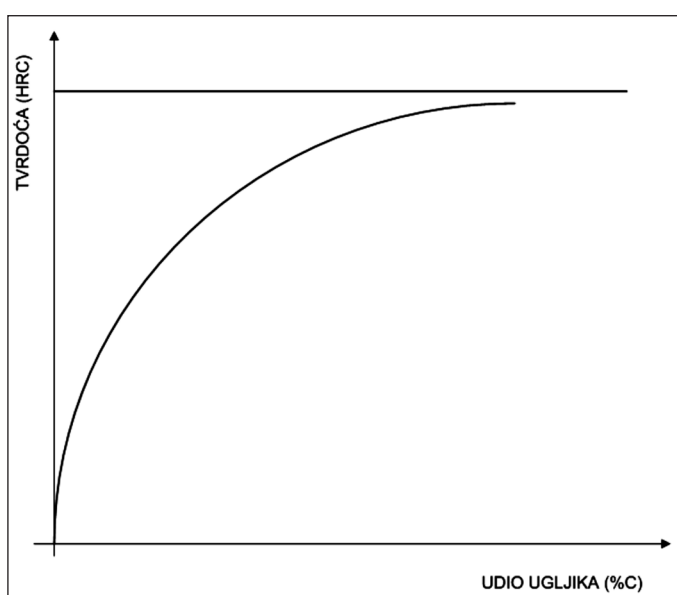
- Nelegirani čelici – primjenjuju se za dijelove manjih presjeka koji nisu jako udarno opterećeni;
- Cr-čelici – primjenjuju se za poluosovine, manje zupčanike i osovine kotača vozila;
- Mn-Cr čelici – primjenjuju se za izradu dijelova srednjih dimenzija;
- Cr-Mo i Mo-Cr čelici – primjenjuju se za bregaste osovine, za koljenaste osovine, zupčanike mjenjačkih kutija;
- Ni-Cr čelici – primjenjuju se za izradu dijelova najvećih dimenzija, kao što su visokopterećeni zupčanici i vratila.

Norme propisuju sljedeće karakteristike: kemijski sastav čelika; maksimalnu tvrdoću (HB) u stanju isporuke; mehanička svojstva u jezgri nakon cementiranja.

Primjeri čelika za cementiranje: C10 (Č1120), C15 (Č1220), C10E (Č1121), C15E (Č1221), 15Cr3 (Č4120), 16MnCr5 (Č4320), 20MnCr5 (Č4321), 20CrMo5 (Č4720), 20MoCr4 (Č7420), 15CrNi6 (Č5420), 18CrNi8 (Č5421).

3.5.5. Čelici za poboljšavanje

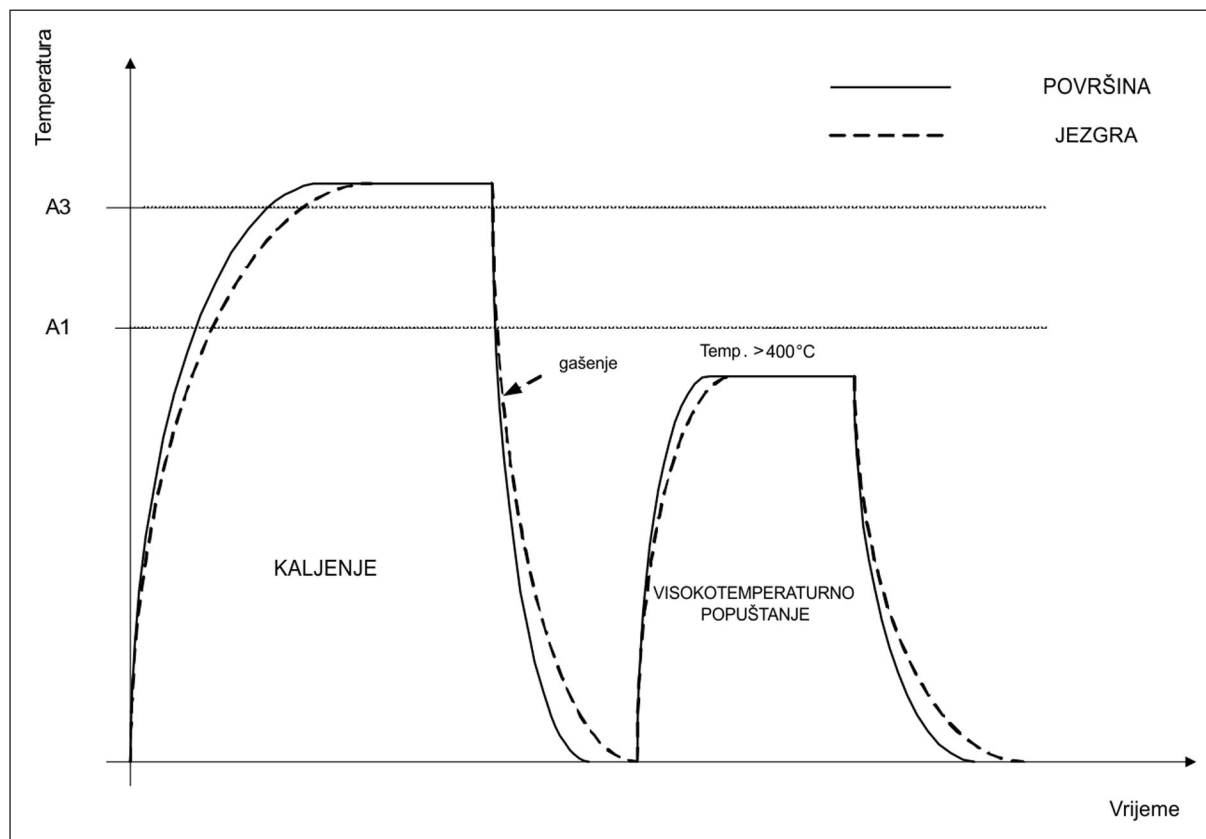
Ovi čelici sadrži od 0,2 do 0,6 % C. Prema svom kemijskom sastavu pripadaju kvalitetnim i plemenitim čelicima. To su nelegirani ili niskolegirani konstrukcijski čelici, koji postup-



Dijagram 3.5: Burnsov dijagram

kom poboljšavanja (kaljenje + visokotemperaturno popuštanje), postižu željenu granicu elastičnosti i čvrstoću, uz dobra svojstva žilavosti.

Na sljedećoj slici je dijagram postupka toplinske obrade poboljšavanja čelika (v. Dijagram 3.6).



Dijagram 3.6: Dijagram postupka poboljšavanja čelika

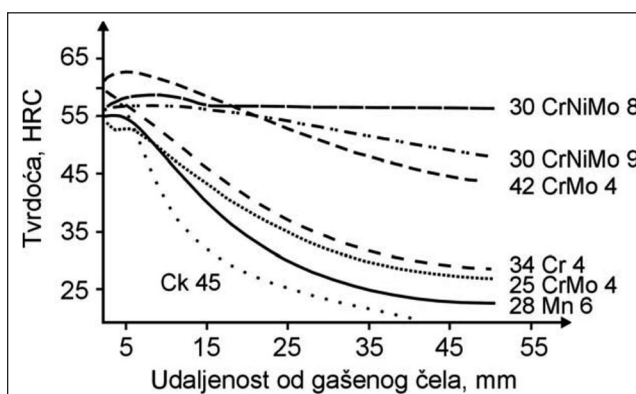
Dakle, postupak poboljšavanja se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Ova skupina čelika primjenjuje se za mehanički, a naročito dinamički visoko opterećene dijelove strojeva i uređaja.

Na prokaljivost čelika primarno utječe maseni udio ugljika i legirnih elemenata – što je viši postotak ugljika i stupanj legiranosti, to je viša prokaljivost. Temperatura popuštanja određuje se prema traženim vrijednostima mehaničkih svojstava nakon poboljšavanja i to iz dijagrama koji postoje za svaki čelik.

U nastavku je prikazana Jominy krivulja prokaljivosti čelika za poboljšavanje (v. Dijagram 3.7).

Iz slike se vidi kako je manganski čelik za poboljšavanje (npr. 28Mn6) bolje prokaljiv od nelegiranog čelika (Ck45), a može se gasiti i u ulju. Međutim, mangan kao gamageni element potiče nastanak grubog zrna i pojavu krhkosti popuštanja.

Krhkost popuštanja je pojava pada žilavosti nakon popuštanja nekih vrsta



Dijagram 3.7: Jominy krivulja prokaljivosti čelika za poboljšavanje [11]

čelika, ako se popuštaju u temperaturnom intervalu od 450 – 600 °C. Ovoj su pojavi skloni Mn-, Cr-, Cr-Mn i Cr-Ni čelici, a nisu skloni čelici legirani s Mo. Pojava krhkosti popuštanja se može spriječiti laganim hlađenjem s temperature popuštanja.

Pojava krhkosti popuštanja je reverzibilna pojava, odnosno jednom doveden u krhko stanje, čelik će ponovno postati žilav, ako ga se ili ponovno popusti pri 500 – 600 °C i naglo ohladi, ili ako ga se ponovno popusti pri temperaturi iznad 600 °C (i ohladi).

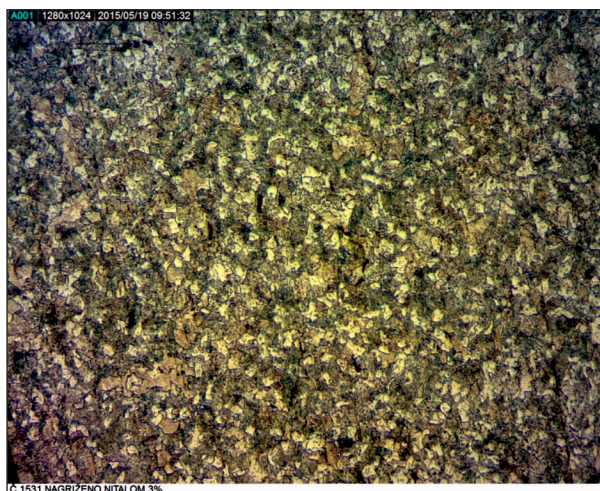
Prema normama razlikujemo sljedeće podskupine čelika:

- a) nelegirani;
- b) legirani s Mn, Mn-Si i Mn-V;
- c) legirani s Cr;
- d) legirani s Cr-Mo;
- e) legirani s Cr-V;
- f) legirani s Ni-Cr.

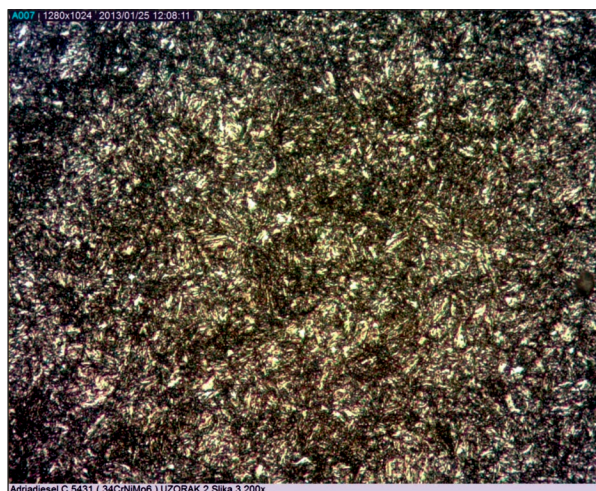
Uz kemijski sastav zajamčene su minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava u poboljšanom stanju i to za različite dimenzije okruglih šipki.

U skupinu čelika za poboljšavanje spadaju: čelici za površinsko kaljenje (površinskim kaljenjem se postižu dobra svojstva površine, slično svojstvima cementiranih čelika) i čelici za velike otkovke (primjenjuju se za dijelove visokotlačnih spremnika i cjevovoda, koljenaste osovine, osovine parnih turbina i generatora, prirubnice i sl.).

U nastavku je prikaz mikrostrukture dvije vrste čelika za poboljšavanje.



Slika 3.4: Mikrostruktura Č1531 [10]



Slika 3.5: Mikrostruktura Č5431 [10]

Primjeri čelika za poboljšavanje: C22 (Č1330), C45 (Č1530), C60 (Č1730), C22E (Č1331), C60E (Č1731), 40Mn4 (Č3130), 34Cr4 (Č4130), 30CrNiMo8 (Č5432).

3.5.6. Čelici za nitriranje

Nitriranje je jedan od najvažnijih postupaka površinske termokemijske obrade. To je postupak obogaćivanja površinskih slojeva dušikom. Sredstva za nitriranje su: tekuća, plinovita ili ionizirane plinske atmosfere. Dušik difundira u površinski sloj čelika.

Proces se provodi pri temperaturama 500 do 580 °C u trajanju od nekoliko sati, pa do oko 15 sati. Pri tome nastaje tanki sloj nitrida, a to su spojevi željeza i dušika. Površinski sloj je otporan na adhezijsko trošenje. Ispod sloja nitrida dušik je dijelom otopljen u feritu što također doprinosi povišenju tvrdoće. Ovisno o vrsti čelika i trajanju procesa postižu se odgovarajuće debljine slojeva.

S obzirom da se nitriranje provodi na temperaturama ispod granice pretvorbe, postignuta tvrdoća se ne temelji na promjeni mikrostrukture, nego na promjeni kemijskog sastava površinskog sloja.

Postoji posebna grupa niskolegiranih čelika za nitriranje koji sadrže 1,0 – 2,5 % C, oko 1 % Al, oko 0,2 % Mo, a mogu sadržavati i druge legirajuće elemente (Ti, Nb, W, Mn) – nitridotvorce, radi dobivanja još viših tvrdoća.

Osim toga, za nitriranje se koriste i niskolegirani čelici koji sadrže aluminij, srednjeuglični niskolegirani čelici s kromom, alatni čelici za rad u toplom stanju, niskougljični niskolegirani krom čelici, alatni čelici koji otvrdnjavaju na zraku, brzorezni čelici, feritni i martenzitni nehrđajući čelici serije AISI 400, austenitni nehrđajući čelici serije AISI 200 i 300, precipitacijski očvrnuti čelici itd.

Primjeri čelika za nitriranje: Č4738 i Č4739.

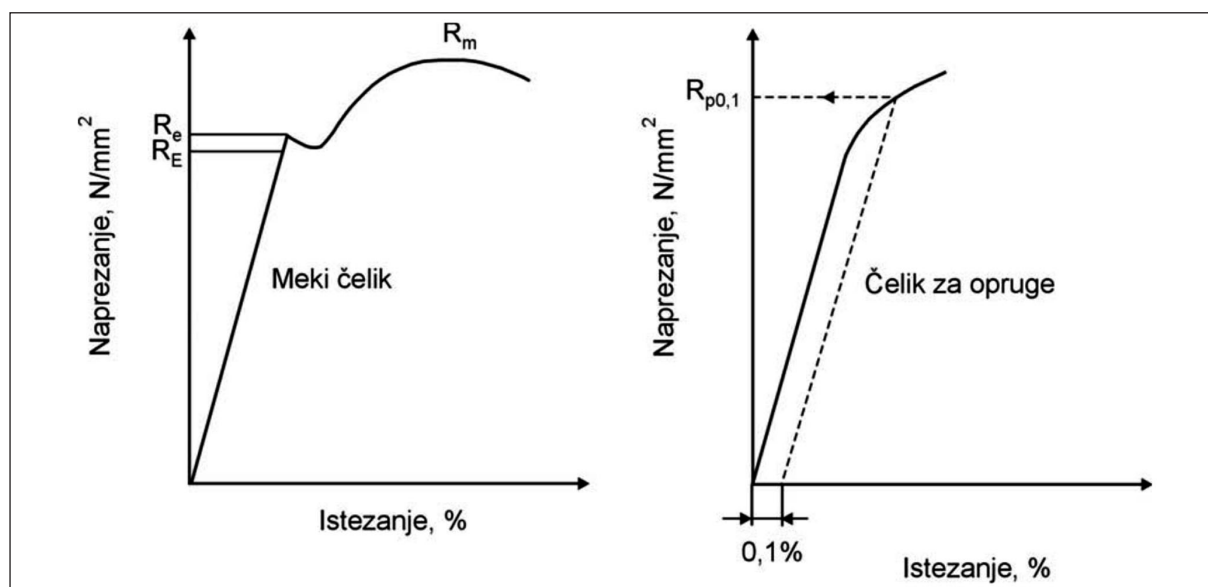
3.5.7. Čelici za opruge

Opružno djelovanje čelika je posljedica modula elastičnosti, a on je za sve čelike u svim strukturnim stanjima konstantan pri 20 °C. Iz ovoga zaključujemo da će svaki čelik imati jednako opružno djelovanje tako dugo dok mu je naprezanje niže od granice elastičnosti, dakle dok se nalazi u području elastičnih deformacija.

Kod opružnih čelika se traži visoka granica elastičnosti, kako bi se oprugu moglo što jače opteretiti.

Visoka granica elastičnosti se kod čelika za opruge ostvaruje povišenim masenim udjelom ugljika, te legiranjem silicijem, manganom, kromom i vanadijem.

Na sljedećoj slici je prikaz dijagrama naprezanje – istezanje za meki čelik i čelik za opruge (v. Dijagram 3.8).



Dijagram 3.8: Dijagrami „naprezanje – istezanje“ za meki čelik (lijevo) i čelik za opruge (desno) [1]

Čelici za opruge moraju postići sljedeća svojstva: visoku granicu razvlačenja, odnosno granicu elastičnosti, kao i visoku vlačnu čvrstoću; sigurnost protiv krhkog loma; visoku dinamičku izdržljivost; otpornost na udarno opterećenje – žilavost.

Primjeri čelika za opruge: 51Si7 (Č2132), 60SiCr7 (Č2332), 55Cr3 (Č4332), 50CrV4 (Č4830).

3.5.8. Čelici poboljšane rezljivosti – čelici za automate

Namijenjeni su za izradu različitih sitnijih dijelova na visokoproduktivnim automatima, pa se zato nazivaju i „čelici za automate“. Ovi čelici moraju imati dobru rezljivost, dakle bolju obradljivost odvajanjem čestica u odnosu na druge čelike.

Čelici poboljšane rezljivosti primjenjuju se za velikoserijsku proizvodnju, ili u slučaju izrade manjih količina, ako bi primjenom drugih čelika troškovi obrade bili previsoki. Kod ove skupine čelika, maseni udio sumpora je povišen na 0,15 do 0,45 %, a isto tako je povišen maseni udio fosfora i mangana. Čelici poboljšane rezljivosti isporučuju se u hladno valjanom, hladno vučenom, ljuštenom i brušenom stanju.

Primjena je za slabije mehanički opterećene dijelove, zbog toga što ovi čelici imaju manju žilavost i dinamičku izdržljivost od ostalih konstrukcijskih čelika.

Norme propisuju sljedeće vrste čelika poboljšane rezljivosti:

- čelici prikladni za cementiranje;
- čelici prikladni za poboljšavanje.

Za ovu skupinu čelika propisuju se kemijski sastav i mehanička svojstva u različitim stanjima isporuke.

Primjeri čelika poboljšane rezljivosti: 10S20 (Č1190), 15S20 (Č1290), 35S20 (Č1490), 45S20 (Č1590).

3.5.9. Korozijski postojani čelici – nehrđajući čelici

Korozija čelika

Korozija je (prema HRN EN ISO 8044) fizikalno kemijsko međudjelovanje metala i njegova okoliša, koje uzrokuje promjenu uporabnih svojstava metala, te može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji oni čine.

Riječ korozija dolazi od latinske riječi *corrodere*, što znači nagristi. Korozija će nastati samo ako između reaktanata (materijala i okoline) postoji afinitet, koji je kvantitativno izražena težnja nekih tvari da međusobno spontano reagiraju.

Korozija kemijski troši metalne i nemetalne konstrukcijske materijale, pri čemu njezina brzina ovisi o termodinamičkim i kinetičkim uvjetima, odnosno o unutarnjim i vanjskim čimbenicima. Oni utječu na pokretačku silu korozije i na otpore koji se suprotstavljaju toj sili. Korozija je gotovo uvijek spontani proces, čija je pokretačka sila kemijski afinitet između materijala i medija.

Korozija se može klasificirati prema mehanizmu procesa, prema razdiobi na površini materijala, prema vremenskom tijeku, prema materijalu koji korodira i prema korozivnom mediju. Najvažnija je svakako podjela prema **mehanizmu procesa**.

Korozija konstrukcijskih materijala prema mehanizmu procesa razlikuje sljedeće vrste korozije:

1. kemijsku (neelektrokemijsku) koroziju metala, koja se zbiva u električki nevodljivim fluidima (neelektrolitima),
2. elektrokemijsku koroziju metala, koja teče u električki vodljivim kapljevinama (elektrolitima),
3. koroziju ili degradaciju nemetala u fluidima.

Unutarnji i vanjski čimbenici korozije variraju lokalno i vremenski, što uzrokuje različite brzine korozije na pojedinim mjestima površine materijala, kao i promjene te brzine s vremenom.

Na tim se pojavama osniva geometrijska klasifikacija prema obliku korozije, te klasifikacija prema tijeku procesa.

Pojavni oblici korozije jesu:

- a) opća, ravnomjerna ili neravnomjerna korozija, koja zahvaća čitavu izloženu površinu materijala, pri čemu je intenzitet oštećenja svuda podjednak ili pak, lokalno različit,
- b) lokalna (mjestimična) korozija, koja zahvaća dio izložene površine materijala, a može biti: jamičasta (pitting) korozija, kontaktna korozija, interkristalna korozija, napetosna korozija, korozija u rasporu, erozija, kavitacija i tribokorozija.

Navedena klasifikacija prema obliku i tijeku procesa korozije, karakteristična je za korozijsko trošenje metalnih materijala, a neki od navedenih oblika karakteriziraju korozijsko trošenje ostalih konstrukcijskih materijala.

Opća korozija je najčešći i najrašireniji, ali i najmanje opasan oblik korozije i često se naziva „hrđanje“. Intenzivnost opće korozije se mjeri gubitkom dimenzija u mm/godini, ili gubitkom mase u $\text{g/m}^2\text{h}$.

Jamičasta, točkasta korozija (pitting) nastupa na brojnim nepredvidivim lokalitetima, a ne po cijeloj površini i očituje se malim jamicama, koje s vremenom prerastaju u rupice. Ova vrsta korozije nastupa najčešće u otopinama halogenida i često zajedno s napetosnom korozijom. Otpornost na jamičastu koroziju može se procijeniti na osnovi vrijednosti tzv. djelotvorne sume elemenata (DS).

Kontaktna korozija nastupa zbog razlike elektropotencijala dva različita metala, koji se nalaze u dodiru u agresivnom mediju (elektrolitu). Tada naime, dolazi do stvaranja galvan-skog članka, pri čemu će više korodirati onaj element koji se ponaša kao anoda.

Interkristalna korozija predstavlja posebno opasan oblik korozije, jer napreduje nevidljivo duž granica zrna, čime se izaziva razaranje metalne veze među kristalitimima u mikrostrukтури čelika i konačno dolazi do raspada cijelog dijela.

Napetosna korozija nastupa kada je dio istovremeno izložen djelovanju agresivnog medija i vlačnog naprezanja. Ovaj tip korozije nastupit će najčešće na hladno deformiranim lokalitetima, jer tamo zaostaju napetosti (naprezanja).

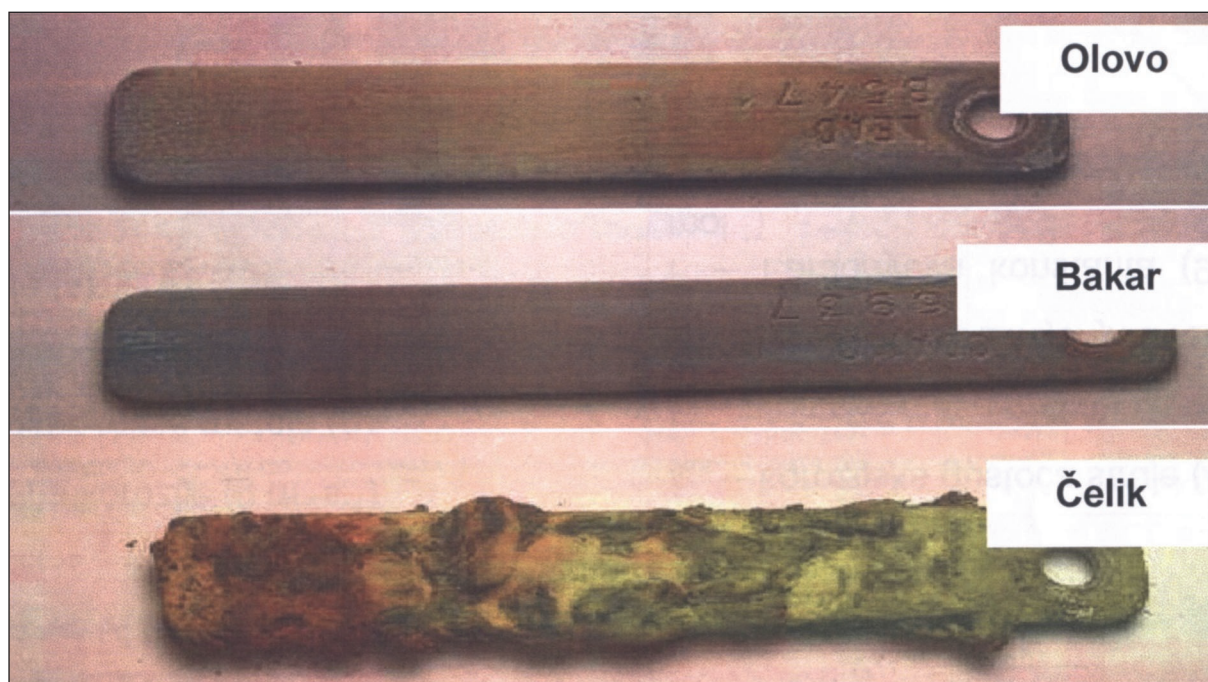
Korozija u rasporu nastaje ako spoj dva dijela ima zračnost dovoljno veliku da u nju uđe elektrolit, ali istovremeno premalu da dođe do obnavljanja dotoka elektrolita i kisika.

Erozija nastupa uz istovremeno djelovanje agresivnog medija i mehaničkog trošenja.

Kavitacija se pojavljuje kada voda ili druga kapljevina struji lokalno vrlo velikim brzinama, pa dolazi do naglog pada tlaka i stvaranja parnih mjehurića, koji implodiraju i pri tome udarno oštećuju površinu.

Tribokorozija je oblik korozije do kojeg dolazi pri ponavljajućem relativnom gibanju dva kruta triboelementa.

Na Slici 3.6 je prikaz korozije različitih metala u istom elektrolitu i istom vremenskom razmaku.



Slika 3.6: Korozija tri različite vrste materijala u istom elektrolitu i istom vremenskom periodu [8]

Korozijska postojanost je svojstvo otpornosti materijala na djelovanje okolnog medija, što znači da je korozijski postojaniji onaj materijal kod kojeg, u jednakim vanjskim uvjetima, dolazi do manje intenzivnog razaranja na površini, ili pak do neželjenih promjena mikroskrukture.

Metode ispitivanja korozije su:

- kontrola površine metala,
- gravimetrijske metode,
- volumetrijske metode,
- analitičke metode,
- konduktometrijska metoda,
- mjerenje dubine pittinga,
- ubrzane metode,
- elektrokemijske metode.

Metodama zaštite od korozije istodobno se koče ili sprječavaju pojave različitih vrsta i oblika korozijskih razaranja. Borba protiv korozije temelji se na alternativnoj primjeni ovih dvaju načela:

- smanjenje ili poništenje afiniteta za proces korozije i
- povećavanje otpora koroziji.

Navedena se načela mogu iskoristiti na tri načina:

- promjenom unutarnjih korozijskih čimbenika (izbor konstrukcijskog materijala, legiranja, konstrukcijske i tehnološke mjere i katodna/anodna zaštita);

- promjenom vanjskih korozivskih čimbenika (inhibitori, odvlaživači i ambalaža);
- stvaranjem nepropusnih barijera između materijala i okoline, nanošenjem prevlaka na konstrukcijske materijale.

Proces korodiranja materijala je povezan sa sposobnošću pasiviranja površine, odnosno stvaranja zaštitne prevlake. Na intenzitet pasivacije čelika, najviše utječe **maseni udio kroma**, ali i drugih legiranih elemenata, kao što su Ni, Mo, W, Ti i Al. Na korozivsku postojanost utječe i maseni udio ugljika i što je taj udio viši, postoji veća opasnost od stvaranja karbida (posebno krom karbida). Postupcima pročišćavanja, može se smanjiti maseni udio ugljika do 0,02 %.

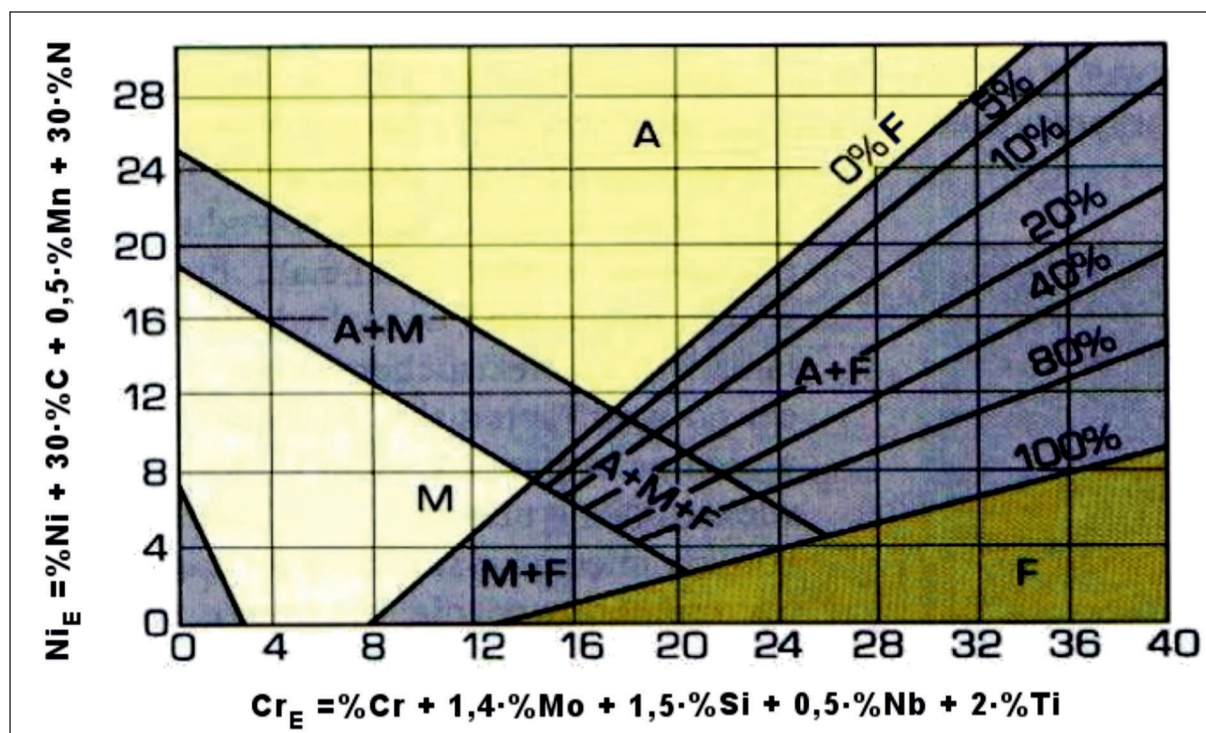
Prvi neophodan uvjet potpune korozivske postojanosti čelika je da taj čelik sadrži **barem 12 % Cr** i to u čvrstoj otopini. Danas korozivski postojani čelici sadrže i do 30 % Cr.

Drugi uvjet korozivske postojanosti čelika je homogena **monofazna mikrostruktura**.

Naime, korozivski postojani čelici bi teorijski morali imati potpuno feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu, bez karbida, oksida, ili drugih intermetalnih faza. Dakle, korozivski postojani čelici moraju sadržavati **što viši postotak kroma i što niži postotak ugljika**.

Monofazna feritna mikrostruktura postiže se legiranjem s alfaformirajućim elementima (feritotvorcima), od kojih je najjači krom, a tu su još silicij, aluminij, molibden, vanadij, niob i titan. Gammaformirajući elementi (austenotvorci) omogućavaju stvaranje monofazne austenitne mikrostrukture; od ovih elemenata najjači je nikal, a tu su još mangan, kobalt, bakar i dušik.

Dobar uvid u postizivu mikrostrukturu na osnovi poznatog kemijskog sastava daje tzv. strukturni Schaefflerov dijagram, koji pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr-ekvivalenta (Cr_E) i Ni-ekvivalenta (Ni_E). U nastavku je prikazan jedan takav Schaefflerov dijagram (v. Dijagram 3.9).



Dijagram 3.9: Schaefflerov strukturni dijagram

S obzirom na sastav i mikrostrukturu, današnji korozijski postojani čelici su svrstani u sljedeće skupine:

1. Cr – čelici, koji prema mikrostrukтури mogu biti: feritni, martenzitni i martenzitno-karbidni i feritno-martenzitni.
2. Cr-Ni, Cr-Ni-Mo i Cr-Mn čelici, koji prema mikrostrukтури mogu biti: austenitni, feritni, martenzitni, austenitno-feritni ($s \leq 10\%$ δ -ferita), martenzitno-feritni i austenitno-martenzitno-feritni.

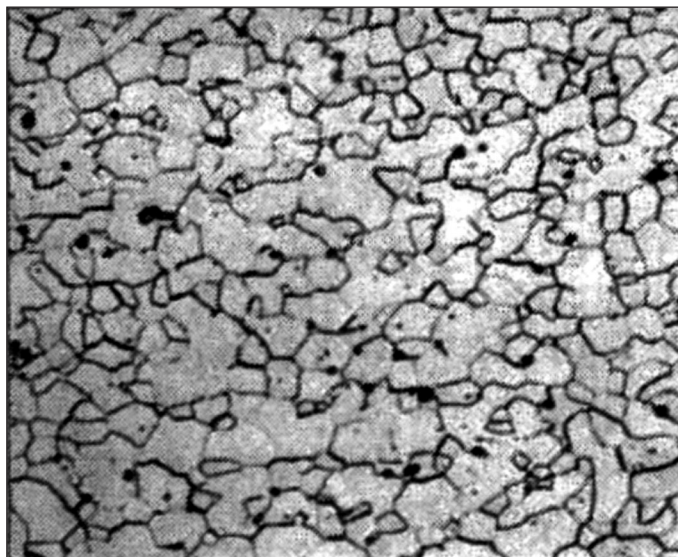
Novije podskupine: superferitni s vrlo niskim % C i niskim masenim udjelima nečistoća (ELA), austenitni s vrlo niskim % C (ELC), austenitni legirani dušikom, duplex čelici i niskougljični martenzitni (mekomartenzitni).

Feritni čelici

Feritni čelici sadrže manje od 0,1 % C i 13 – 17 % Cr, pa zbog toga zadržavaju feritnu mikrostrukturu, pri gotovo svim temperaturama i zato se ne mogu zakaliti.

Na Slici 3.7 je mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika.

Osnovna svojstva feritnih čelika: relativno su mekani; magnetični su; relativno su slabo zavarljivi; slabo su oblikovljivi deformiranjem; postojani su prema oksidirajućim kiselinama (HNO_3) i neosjetljivi su na plinove koji sadrže sumpor; manje su postojani prema kloridnim otopinama; nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije; umjereno su postojani na pojavu jamičastog oštećenja, ako sadrže Mo; nisu otporni na rastaljene metale (Al, Sb i Pb), soli i reducirajuće medije; jeftiniji su od drugih nehrđajućih čelika; skloni su lomljivosti pri niskim temperaturama.



Slika 3.7: Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika [1]

Primjeri feritnih čelika: X6Cr17 (Č4174), X6CrMo17, X8CrNb17.

Superferitni čelici (ELA = Extra Low Additions)

Neka loša svojstva feritnih čelika mogu se poboljšati povećanjem čistoće sastava čelika pročišćavanjem u vakuumskim pećima i u elektronskom mlazu, a isto tako i smanjenjem postotka ugljika, povišenim postotkom kroma i legiranjem s molibdenom i niklom, kao i titanom ili niobom.

Zbog svega navedenog, kao i zbog niže cijene, ovi čelici mogu biti nadomjestak za skuplje austenitne čelike.

Martenzitno-feritni čelici

Ovi čelici sadrže do 0,20 % C i 13 – 17 % Cr. Imaju višu čvrstoću, tvrdoću i otpornost na trošenje od feritnih čelika, ali i nižu korozijsku postojanost. Postojani su na djelovanje vode, vodene pare i vlažnog zraka.

Primjeri martenizitno-feritnih čelika: X10Cr13 (Č4170), X15Cr13 (Č4171), X15CrMo13.

Martenizitni čelici

Martenizitni čelici imaju povišeni maseni udio ugljika (0,15 – 1 % C) i u pravilu preko 13 % Cr, a također je moguće legiranje s molibdenom i niklom.

Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost se postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem.

Kod konstrukcijskih čelika (sadrže do 0,25 % C) je u prvom planu korozijska postojanost, a kod alatnih (više od 0,3 % C) još i otpornost na abrazijsko trošenje. U odnosu na feritne i austenitne čelike, imaju višu tvrdoću i čvrstoću, kao i bolju otpornost na trošenje.

Martenizitni nehrđajući čelici su osjetljivi prema vodikovoj krhkosti i imaju lošu otpornost na udarni rad loma kod sniženih temperatura. U odnosu na austenitne i feritne nehrđajuće čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću, kao i otpornost na trošenje. Uglavnom se koriste u poboljšanom stanju.

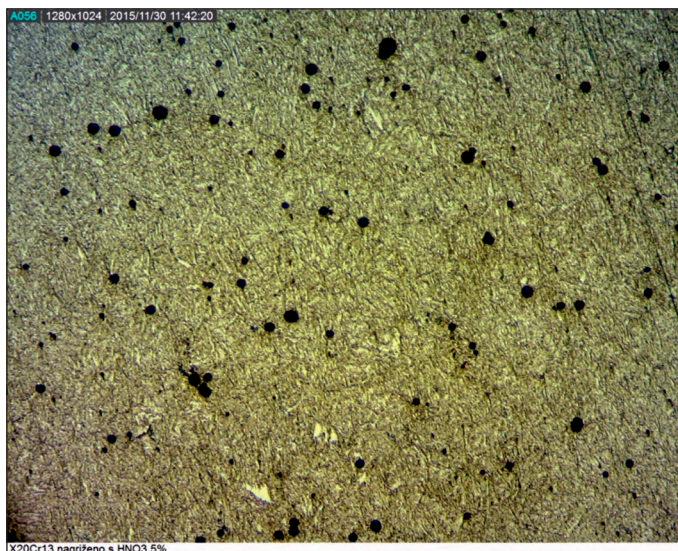
Na Slici 3.8 je mikrostruktura martenizitnog čelika.

Primjeri martenizitnih čelika:

X20Cr13 (Č4172), X22CrNi17 (Č4570), X30Cr13 (Č4173), X90CrMoV18 (Č4772).

Mekomartenizitni čelici

To su niskougljični (oko 0,03 – 0,05 % C) martenizitni čelici, kod kojih se sniženje mehaničkih svojstava zbog sniženja masenog udjela ugljika, nadomješta legiranjem s kromom (13 – 18 % Cr), niklom (1 – 6 % Ni) i molibdenom (< 3 % Mo). Optimalna temperatura popuštanja je 600 °C. S obzirom na vrijednosti čvrstoće, spadaju u grupu visokočvrstih čelika.



Slika 3.8: Mikrostruktura Č4172 [10]

Imaju dobru postojanost na opću koroziju, međutim, slabo su postojani na pitting koroziju. Primjenjuju se izradu onih dijelova koji su izloženi agresiji nečistog zraka i vode.

Austenitni i austenitno-feritni čelici s ≤ 10 % δ ferita

To su visokolegirani čelici s kromom i niklom, koji proširuju austenitno područje sve do normalnih temperatura. Maseni udio ugljika je nešto niži (< 0,15 % C), dok je maseni udio kroma viši od 18 % zbog dobre korozijske otpornosti. Maseni udio nikla je više od 8 %, a moguće je i dodatno legiranje s Mo, Ti, Nb i Ta. Povišeni maseni udio dušika (0,2 – 0,4 %) djeluje na povišenje čvrstoće i na otpornost na napetosnu i pitting koroziju.

Austenitni čelici su nemagnetični i dobro oblikovljivi u hladnom stanju, a uz dodatno legiranje s Mo, W i V pokazuju vrlo dobru otpornost na puzanje pri temperaturama većim od 600 °C. Imaju zadovoljavajuću žilavost pri sniženim temperaturama, pa se primjenjuju do -273 °C. Otporni su na organske i anorganske kiseline, lužine i soli i u određenim uvjetima su podložni interkristalnoj koroziji.

S obzirom na činjenicu da se sniženjem udjela ugljika postiže povećana otpornost na interkristalnu koroziju, razvila se grupa **austenitnih čelika sniženog masenog udjela ugljika (ELC = Extra Low Carbon)**.

Kako dušik kao gamageni element može zamijeniti skupi nikal, a isto tako ublažava alfa-geno djelovanje molibdena, razvijeni su **austenitni čelici legirani dušikom**, koji imaju dobru zavarljivost, zbog niskog masenog udjela ugljika.

Primjeri austenitno-feritnih čelici s niskim udjelom ferita (< 10 %): X12CrNi18-8 (Č4571), X5CrNi18-9 (Č4580), X10CrNiTi18-9 (Č4572).

Primjeri austenitnih monofaznih čelika: X5NiCrMoCuNb20-18, X5CrNiMoTi25-25.

Primjeri niskougljičnih austenitnih čelika (ELC): X2CrNi18-9, X2CrNiMo18-10, X2NiCrMo18-12.

Austenitno-feritni (duplex) čelici

Čelici iz ove skupine nemaju monofaznu mikrostrukturu, nego dvofaznu, kako im samo ime kaže, austenitno-feritnu (40 – 60 % ferita). Dvofaznost čelika može izazvati teškoće pri zavarivanju, zbog sklonosti krhkosti ferita i mogućnosti izlučivanja karbida po granicama zrna ferit/austenit. Sve je šire područje primjene ovih čelika u industriji nafte i plina, u industriji papira, u petrokemijskoj industriji i drugdje.

3.5.10. Čelici za rad pri visokim temperaturama

Čelici su materijali koji imaju relativno visoko talište, u odnosu na npr. aluminij, ili u odnosu na polimerne materijale. Isto tako, čelici imaju bolju mehaničku otpornost pri povišenim temperaturama, pa zato imaju i prednost u primjeni, u odnosu na druge materijale.

Radne temperature proizvoda od metala dijele se na:

- a) niske temperature, pri čemu je $T_r < 0,25 T_t$;
- b) povišene temperature, pri čemu je $0,25 T_t < T_r < 0,4 T_t$;
- c) visoke temperature, pri čemu je $T_r > 0,4 T_t$.

Pri tome je T_r = radna temperatura, dok je T_t = temperatura tališta metala.

Kod čelika i željeznih materijala, temperature do 180 °C smatraju se niskima, jer ne dolazi do bitnijih promjena mehaničkih svojstava. Radne temperature od 180 °C do 450 °C kod čelika i željeznih materijala su povišene, a temperature iznad 450 °C su visoke, jer pri tim temperaturama počinje puzanje čelika.

Iako iskustvo pokazuje da se kod većine materijala zadovoljavajuća mehanička svojstva postižu do temperatura od 2/3 temperature tališta, u praksi je maksimalna radna temperatura uglavnom niža.

Povišene ili visoke temperature vladaju u termoenergetskim postrojenjima, u kemijskim i procesnim postrojenjima, u metalurškim pogonima, motorima s unutarnjim izgaranjem, raketama i svemirskim brodovima i sl.

Na Slici 3.9 je prikaz mikrostrukture čelika X22CrMoV12-1.

S obzirom da su pri izboru materijala za dijelove takvih uređaja najvažnija mehanička svojstva, u nastavku se navode pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama:

- 1) **Sniženje vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i modula elastičnosti, te istovremeno povećanje istezljivosti, suženja poprečnog presjeka i žilavosti.**

- 2) **Pojava puzanja** – Puzanje materijala je spora deformacija materijala nastala uslijed djelovanja dugotrajnog konstantnog opterećenja pri povišenoj temperaturi.

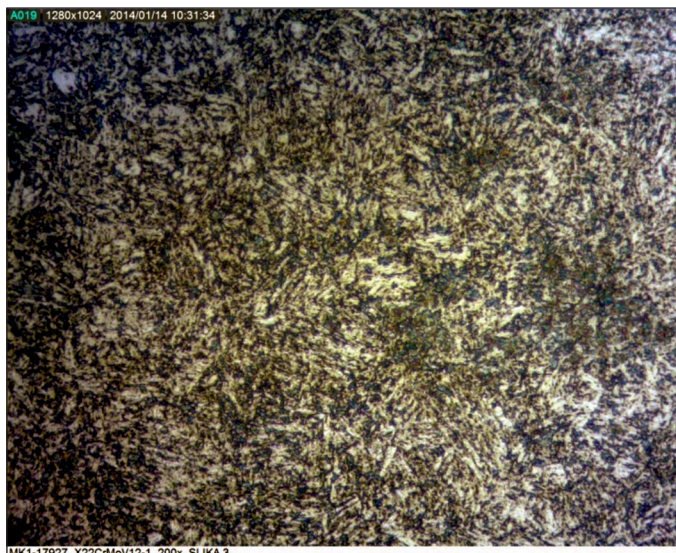
Proces puzanja podijeljen je u tri stadija.

Prvi stadij naziva se **početni stadij puzanja** i tu krivulja ne počinje iz ishodišta dijagrama, budući da je deformacija nastala istog časa kad je ispitni uzorak opterećen. Prvi stadij karakterizira u početku povećana i promjenjiva brzina puzanja.

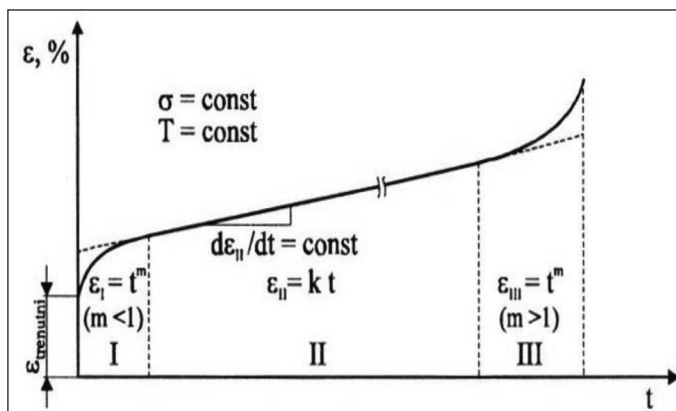
Drugi stadij se naziva **stadij konstantne brzine puzanja**, pa kao što mu ime govori, prirast istezanja u jedinici vremena je približno konstantan.

Treći stadij puzanja se naziva **završni stadij puzanja**, kada opet dolazi do sve većeg prirasta istezanja u jedinici vremena.

U tom trećem stadiju puzanja, dolazi konačno i do **loma epruvete** (v. Dijagram 3.10).



Slika 3.9: Mikrostruktura čelika X22CrMoV12-1 [10]



Dijagram 3.10: Dijagram puzanja [7]

3) Smanjenje dinamičke izdržljivosti

Za izbor materijala i proračun mehanički opterećenih dijelova konstrukcija koje su izvrnute povišenim temperaturama, bitna su sljedeća mehanička svojstva: vrijednost konvencionalne granice razvlačenja pri radnoj temperaturi, vrijednost vlačne čvrstoće pri radnoj temperaturi, vrijednost modula elastičnosti pri radnoj temperaturi, vrijednost istezljivosti pri radnoj temperaturi, vrijednost granice puzanja pri nekoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja, granica puzanja po DVM pri definiranoj temperaturi i vrijednost statičke izdržljivosti pri definiranoj temperaturi za određeno vrijeme djelovanja opterećenja.

Za poboljšavanje mehaničke otpornosti pri povišenim temperaturama potrebno je da čelici po mogućnosti sadrže u kristalu mješancu legirne elemente koji koče pokretljivost atoma (na primjer Mo i Co).

Poželjno je da toplinski čvrsti čelici imaju grublje zrno, jer je tada ukupna površina granica zrna manja, što znači i ukupno kraća mjesta niže čvrstoće.

Vrste čelika mehanički otpornih pri povišenim temperaturama

S obzirom na temperaturno područje primjene, razlikuju se četiri osnovne podskupine čelika:

- a) ugljični (nelegirani) čelici;
- b) niskolegirani čelici;
- c) visokolegirani martenizirni čelici;
- d) visokolegirani austenitni čelici.

Ugljični (nelegirani) čelici – primjer je čelik za kotlovske limove

Ovi čelici moraju imati dovoljno visoku čvrstoću pri povišenim temperaturama, zbog djelovanja tlaka, zatim odgovarajuću žilavost i otpornost na starenje, postojanost prema vodi, vodenoj pari i lužinama, te otpornost na interkristalnu koroziju i vrlo dobru zavarljivost. To su čelici koji imaju zajamčen kemijski sastav i zajamčena mehanička svojstva. Kotlovski čelici se isporučuju u obliku toplovaljanih limova ili ploča, a primjenjuju se za izradu oplata parnih kotlova, cijevi i spremnika.

Primjeri nelegiranih čelika za kotlovske limove: P235GH (Č1202), P265GH (Č1204).

Niskolegirani čelici

Ovi čelici su legirani s molibdenom, ili molibdenom i kromom, a kod nekih vrsta uz dodatak vanadija. Zbog niskog masenog udjela ugljika ($< 0,25\%$), dobro su zavarljivi. Molibden i krom stvaraju posebne karbide, koji usporavaju pojavu puzanja, a povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Element molibden sprječava pojavu krhkosti kod popuštanja. Krom djeluje na povećanje mehaničke otpornosti, istezljivosti i oksidacijske postojanosti.

Primjena ove vrste čelika je najviše u termoenergetskim postrojenjima. Pretežno se izrađuju u obliku cijevi i limova, a mikrostruktura im je feritno-perlitna, ako su normalizirani, ili bainitna, ako su poboljšani.

Primjeri niskolegiranih toplinski čvrstih čelika: C35E (Č1431), 15Mo3 (Č7100), 13CrMo4-4 (Č7400).

Visokolegirani čelici – super 12 % Cr martenizirni čelici

Ovi su čelici razvijeni iz martenizirne vrste X20Cr13 i to modificiranjem sastava, kako bi se ostvarila viša mehanička otpornost pri povišenim temperaturama i istovremeno visoka postojanost na opću koroziju.

Ovi čelici sadrže oko 1 % Mo i do 12 % Cr. U čvrstoj otopini ima manje od 12 % Cr, što uzrokuje manju korozijsku otpornost.

Otporni su na djelovanje vodika i na sulfidnu napetosnu koroziju, ako se popuštaju na tvrdoću < 24 HRC, a kako sadrže molibden, nisu podložni krhkosti popuštanja, kao feritni nehrđajući čelici.

Primjenjuju se za duži rad pri temperaturama od 550 – 600 °C, a primjer primjene su lopatice, rotor i kućišta parnih turbina.

Primjeri super 12 % Cr toplinski visoko postojanih čelika: X19CrMo12-1, X20CrMoV12-1, X19CrMoVNb11-1.

Visokolegirani čelici – austenitni Cr-Ni čelici

S obzirom da austenitna mikrostruktura ima FCC rešetku, tako je već samim tim viša mehanička otpornost ovih čelika pri visokim temperaturama. Ovi čelici se još dodatno legiraju s molibdenom, volframom, vanadijem, titanom i niobom, što omogućuje izlučivanje karbida, te precipitiranje toplinski postojanih intermetalnih faza, što još povišuje tu otpornost.

Zbog vrlo visoke temperature rekristalizacije (iznad 900 °C), moguća je njihova dugotrajna primjena pri temperaturama od 600 – 750 °C.

Uz visoku otpornost na puzanje, austenitni čelici imaju vrlo dobru kemijsku otpornost, odnosno vatrootpornost.

Primjeri austenitnih visokopostojanih čelika za rad pri temperaturama 600 – 800 °C: X6CrNi18-11, X40CrNiCoNb13-13, X12CrNiWTi16-13, X50CoCrNi20-20-20.

Vatrootporni čelici

Kod temperatura viših od 550 °C, u okolišu vrućeg zraka, vodene pare, agresivnih plinova, plamena i sličnih uvjeta, dolazi kod čelika do kemijske korozije, koja je uvjetovana intenzivnom oksidacijom. Pri tome se kod nelegiranih čelika na površini stvaraju slojevi oksida željeza, koji nisu dovoljno kompaktni da spriječe daljnju difuziju kisika i porast debljine sloja, pa s vremenom dolazi do ljuštenja sloja, zbog tlačnih naprezanja i stvaranja novih oksida.

Legiranje čelika s elementima koji imaju viši afinitet prema kisiku od željeza (Cr, Si, Al), pospješuje najprije oksidaciju tih elemenata u površinskom sloju, a time i kočenje daljnje difuzije. Na vatrootpornost čelika najpovoljnije djeluje legiranje s kromom.

Od vatrootpornih čelika se u praksi često još traži i dovoljna mehanička otpornost. Kako kod nekih čelika vatrootpornost i mehanička otpornost nisu jednako povoljne, u tom slučaju uvjeti rada određuju koja će od tih svojstava biti primarna pri izboru odgovarajućeg materijala. Vatrootporni čelici ne smiju imati mikrostrukturnih pretvorbi, pa su oni zato ili feritne, ili austenitne strukture.

Primjeri primjene vatrootpornih čelika su: dijelovi ložišta generatora pare, dijelovi metalurških peći i sl.

Primjeri vatrootpornih čelika: X10CrSi13, X10CrAl18.

Čelici za ventile motora

Ventili motora s unutarnjim izgaranjem su u radu izloženi vrlo visokim temperaturama (ponekad i preko 900 °C), a također dolazi i do stalnih promjena temperature. Izloženi su djelovanju agresivnih plinova, kao i mehaničkom opterećenju.

Zbog svega navedenog, ovi čelici moraju imati: dovoljnu čvrstoću i dinamičku izdržljivost pri povišenim temperaturama, dobru otpornost na oksidaciju i koroziju, nisku toplinsku ras-tezljivost i visoku toplinsku vodljivost, te visoku otpornost na trošenje.

Nedostatak visokolegiranih čelika je slaba toplinska vodljivost, pa se odvođenje topline rješava primjenom nelegiranih čelika za stablo ventila, ili pak unutarnjim hlađenjem stabla.

Primjeri čelika za ventile: X10NiCrAlTi32-20 (Č4974), X53CrMnNiN21-9 (Č4588).

3.5.11. Čelici za rad pri niskim temperaturama

Snižavanjem temperature padaju vrijednosti sljedećih svojstava: duktilnosti – istezljivosti, kontrakcije presjeka, žilavosti (udarni rad loma), toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti, te specifičnog toplinskog kapaciteta. Istovremeno, snižavanjem temperature rastu: tvrdoća, vlačna čvrstoća i granica razvlačenja, kao i osjetljivost na zarezno djelovanje.

Kod čelika prikladnih za rad pri niskim temperaturama, najvažnije zahtijevano svojstvo je **žilavost**, što znači da se od ovih čelika traži neosjetljivost na krhki lom.

Vrijednost udarnog rada loma pri radnoj temperaturi i iznos prijelazne temperature su gotovo jedini kriteriji za izbor čelika.

Kao „hladno žilav“ se može definirati onaj čelika koji pri temperaturi od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ postiže vrijednost udarnog rada loma od 27 J, ili ima prijelaznu temperaturu nižu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ispitivanje udarnog rada loma radi se na Charpyevom batu, a iz ispitivanog materijala potrebno je izraditi probni uzorak (epruvetu), u skladu sa standardom. Vrijednost udarnog rada loma pokazuje hoće li se materijal ponašati žilavo ili krhko u uvjetima udarnog opterećenja.

Epruveta, oslonjena na dva oslonca, savojno se opterećuje udarcem brida bata u sredini raspona nasuprot utoru. Uslijed udarca epruveta puca u korijenu utora, ili je oštrica bata provlači savinutu, ali ne slomljenu, između oslonaca. Vrijednost udarnog rada loma je prvenstveno pokazatelj žilavosti materijala. Što je udarni rad loma veći, to je i materijal žilaviji.

Energija potrebna da brid Charpyeva bata prelomi epruvetu, ili je provuče između oslonaca, jednaka je **udarnom radu loma**.

$$KV(U) = G(h_1 - h_2) ; [J].$$

G = težina bata ; [N]

h_1 = početna visina bata ; [m]

h_2 = visina koju je bat dosegnuo nakon loma ili provlačenja epruvete ; [m].

Iznos udarnog rada loma izražava se u J (Nm).

V – epruveta s „V“ utorom

U – epruveta s „U“ utorom.

Za postizanje dovoljno visoke žilavosti pri niskim temperaturama, čelici moraju imati posebno podešen kemijski sastav i mikrostrukturu u odnosu na obične konstrukcijske čelike.

Osnovna primjena ove vrste čelika je u tehnici hlađenja i „dubokog“ hlađenja, gdje temperature padaju gotovo do apsolutne nule (oko -270°C).

Postoje tri osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama:

- Niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati čelici – primjenjuju se u normaliziranom stanju do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, a poboljšani niskolegirani sitnozrnati čelici se primjenjuju na temperaturama do $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Čelici legirani s niklom (1,5 – 9 % Ni) za poboljšavanje – primjenjuju se u temperaturnom intervalu od -85 do $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nikal je djelotvoran element za povišenje žilavosti pri niskim temperaturama, zato što pospješuje stvaranje sitnog zrna i vrlo žilavog Fe-Ni martenzita nakon kaljenja. Čelici iz ove skupine nemaju visoku otpornost na koroziju, kao što je imaju austenitni čelici i sklone su krhkosti nakon popuštanja, pa se trebaju ubrzano hladiti nakon popuštanja.

c) Cr-Ni i Cr-Ni-N(Nb,Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N austenitni čelici – ovi čelici imaju dovoljnu žilavost čak i u blizini apsolutne nule.

Primjena čelika za rad pri niskim temperaturama su: spremnici tekućih plinova pod tlakom, cjevovodi za tekuće plinove, te razni uređaji u tehnici hlađenja.

Primjeri čelika za rad pri niskim temperaturama: P355NL1, S500NL, X5CrNi18-10, X10CrNiTi18-10.

3.5.12. Visokočvrsti čelici

Kombinacijom više mehanizama očvrnuća: usitnjenjem zrna, martenzitnom transformacijom, precipitacijom povezano s deformacijom austenita, postižu se najviše vrijednosti granice razvlačenja ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$) i čvrstoće od svih polikristalinih materijala.

Međutim, osim postizanja visoke vlačne čvrstoće i granice razvlačenja visokočvrsti čelici moraju posjedovati i visoku žilavost, visoku dinamičku izdržljivost, otpornost na koroziju, čvrstoću pri povišenim i visokim temperaturama, potpunu prokaljivost (95 % martenzita u jezgri), laku obradljivost odvajanjem čestica, dobru zavarljivost i mogućnost toplinske obrade.

U pogledu mikrostrukturnih zahtjeva nastoji se dobiti sitnozrnata homogena mikrostruktura uz izbjegavanje lokalnih heterogenosti (makrosegregacije, kristalne segregacije, uključci). Heterogenost u atomarnom i submikroskopskom području je poželjna radi jednoličnog usporavanja gibanja dislokacija. Postizanje visoke vlačne čvrstoće obično dovodi do snižavanja plastičnosti i otpornosti na krhki lom. Pouzdanost čelika u konstrukcijama karakterizirana je konstrukcijskom čvrstoćom, tj. skupom mehaničkih svojstava koja ovise o radnim uvjetima. Glavni parametri konstrukcijske čvrstoće su vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, žilavost i prijelazna temperatura žilavosti, te pukotinska lomna žilavost (K_{IC}).

S obzirom na skupu proizvodnju čelika ove vrste, njihova primjena je opravdana samo za one dijelove visokopterećenih, pouzdanih konstrukcija, kao što su dijelovi vozila, zrakoplova, raketa i svemirskih letjelica, zatim dijelovi oružja i dr.

Visokočvrsti čelici se dijele u sljedeće grupe:

1. niskolegirani niskopopušteni čelici,
2. visokolegirani (Cr-Mo-V) visokopopušteni čelici,
3. korozijski postojani precipitacijski očvrsnuti čelici,
4. termomehanički obrađeni čelici,
5. hladno oblikovani nelegirani ili niskolegirani čelici,
6. čelici *maraging*.

Niskolegirani niskopopušteni čelici

Kemijski sastav ove skupine čelika karakterizira legiranje silicijem ili niklom te kombinacijom Cr-Mo-V. Značajka toplinske obradbe je "srednje popuštanje" koje se kod drugih čelika uglavnom ne preporuča zbog pojave niskotemperaturne krhkosti popuštanja ("krhkost 260"). Silicij pomiče područje niskotemperaturne krhkosti prema višim temperaturama ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) te omogućava porast granice razvlačenja srednjim popuštanjem pri oko $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Čelici bez silicija ali legirani niklom i kromom ili molibdenom i vanadijem također imaju dovoljnu žilavost nakon srednje temperaturnog popuštanja. Vrijednosti granice razvlačenja i čvrstoće iznose i do 2000 N/mm².

Visokočvrsti niskolegirani niskopopušteni čelici uglavnom se primjenjuju kada je potrebna ušteda na masi, tj. za lake konstrukcije kao što su: visokotlačni spremnici u transportnim zrakoplovima i brodovima; visokonapregnute karoserije zrakoplova; dijelovi tijela svemirskih raketa; dijelovi rampi za lansiranje raketa itd.

Visokolegirani Cr-Mo-V visokopopušteni čelici

Po svom sastavu (oko 0,4 % C; oko 1 % Si; oko 5 % Cr; 1,3 – 2 % Mo i 0,4 – 1 % V), kao i po načinu toplinske obrade (kaljenje i visokotemperaturno popuštanje), poznati su i kao alatni čelici za topli rad.

Najpoznatija vrsta je X37CrMoV5-1 (Č4751). Vrijednosti vlačne čvrstoće su i do 2000 N/mm².

Korozijski postojani precipitacijski očvrsnuti čelici

Razvojem korozijski postojanih precipitacijski očvrnutih čelika (**PH** – čelici, od engl. **P**recipitation **H**ardenable ili **P**recipitation **H**ardened), ostvaruje se visoka granica razvlačenja, a istovremeno se zadržava visoka korozijska postojanost. S obzirom na mikrostrukture prije precipitacije, razlikujemo: martenzitne PH-čelike, poluaustenitne PH-čelike i austenitne PH-čelike.

Termomehanički obrađeni čelici

Kombiniranjem postupaka oblikovanja deformiranjem i toplinskih obrada kaljenja i izotermičkog poboljšavanja postojećih sastava čelika, može se dobiti istovremeno visoku granicu razvlačenja i čvrstoću, uz relativno dobru plastičnost (duktilnost), odnosno visoku sigurnost od krhkog loma.

Deformiranje se odvija prije ili za vrijeme transformacije mikrostrukture (termomehanička obrada), ili nakon faznih pretvorbi (mehanotermička obrada).

Primjenjuju se sljedeće termomehaničke ili mehanotermičke obrade:

- a) *Ausforming* postupak;
- b) Postupak *TRIP* (engl. Transformation Induced Plasticity);
- c) *Perliforming* postupak;
- d) *Isoforming* postupak;
- e) *Marforming* postupak.

Kod postupka **ausforming** se austenitizirani čelik hladi do temperature gdje je vrijeme inkubacije najduže, zatim se plastično deformira valjanjem, a nakon toga se gasi, tj. pretvara se u martenzit. Uzrok povišenja čvrstoće je velika gustoća dislokacija, koje nastaju deformacijom i ostaju i nakon pretvorbe u martenzit.

Postupak **TRIP** je sličan ausformingu, a primjenjuje se za austenitne čelike precizno reguliranog sastava (tzv. TRIP čelici), kod kojih je moguća pretvorba prethodno precipitacijski otvrdnutog austenita u deformacijski martenzit valjanjem pri temperaturi okoline.

Postupak **perliforming** je postupak mehanotermičke obrade, jer se deformiranje perlita odvija ili nakon kontinuirane, ili nakon izotermičke pretvorbe iz austenita.

Postupak **isoforming** provodi se tako da se deformiranje odvija pri izotermi i to prije i za vrijeme fazne pretvorbe austenita u perlit.

Postupkom **marforming** se deformira martenzitna mikrostruktura i to na dva načina: ili između dva popuštanja zakaljenog čelika (deformacijsko popuštanje), ili tijekom popuštanja zakaljenog čelika (dinamičko deformacijsko starenje).

Hladno oblikovani nelegirani ili niskolegirani čelici

Ovaj postupak porasta čvrstoće čelika najčešće se primjenjuje za očvršćivanje tanke žice za transportnu užad i užad žičara, žice za opruge, tanki limovi i trake, betonski čelik i sl. Izrazito visoka čvrstoća dobije se postupkom patentiranja hladno vučene žice eutektoidnog čelika.

Postupak patentiranja obuhvaća žarenje žice u austenitnom području, te izotermičko držanje na 500 – 520 °C u solnoj ili olovnoj kupci. Na taj način dolazi do postizanja tankolističave feritno-karbidne mikrostrukture (sorbit) koja se vrlo dobro hladno oblikuje. Hladnim oblikovanjem uz stupanj deformacije 98 – 99 % postižu se visoke vrijednosti čvrstoće. Čelici koji se obrađuju ovim postupkom moraju imati visoku čistoću, bez nemetalnih uključaka i plinova.

Čelici *maraging*

Ime ove skupine čelika dolazi od engleskog *martensite aging*, što znači dozrijevanje martenzita.

Po sastavu su niskougljični (< 0,03 % C), visokolegirani u ternarnom sustavu Fe-Ni-Co, ili podsustavima Fe-Ni-Cr i Fe-Co-Cr s dodacima Mo, Ti, Al i Co i eventualno B i Zr.

Uobičajeno, ovi čelici sadrže: oko 18 % Ni; 7 – 14 % Co; 3 – 6 % Mo; 0,15 – 2 % Ti; 0,05 – 0,2 % Al. Čelici *maraging*, osim visoke granice razvlačenja, čvrstoće i lomne žilavosti, imaju i bolja tehnološka svojstva u odnosu na ostale visokočvrste čelike. Čelici *maraging* primjenjuju se i kao konstrukcijski i kao alatni čelici.

3.6. Alatni čelici

3.6.1. Razvoj i podjela alatnih čelika

Već u davna vremena čovjek je počeo koristiti alate i to prvo od kamena (kamena sjekira, nož, toljaga i sl.), a zatim od željeza. Kontaktom željeza s pougljičujućim sredstvom u vatri, čovjek je zapravo slučajno otkrio čelik.

Razvoj modernih industrijskih alata doživljava tehnološku revoluciju u drugoj polovici 19. stoljeća. U tom razvoju najvažnije je istaknuti sljedeće godine:

- 1868. g. Mushetov čelik (2 % C, 7 % W, 2,5 % Mo),
- 1898. g. Taylor-Whiteov brzorezni čelik (1,85 % C, 3,8 % Cr, 8 % W),
- 1904. g. J. A. Mathews – brzorezni čelik s vanadijem,
- 1910. g. razvoj wolframovih čelika za topli rad,
- 1912. g. dodatak kobalta u alatne čelike,
- 1930. g. započinje razvoj brzoreznih čelika legiranih molibdenom.

Slijedi daljnji razvoj alata sve do današnjih dana, kada alatni čelici služe za izradu alata kojima se obrađuju i oblikuju kako metalni, tako i nemetalni materijali.

Primjeri alata su: alati za obradu odvajanjem čestica; alati za rezanje i hladno oblikovanje metala; alati za toplo oblikovanje metala; alati za oblikovanje nemetala; mjerni alati.

Od alatnih čelika se zahtijevaju posebna svojstva, kao što su: visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, postojanost tvrdoće pri povišenim temperaturama, toplinska obradljivost i drugo. Alatni čelici se primjenjuju u toplinski obrađenom stanju, primarno zakaljeni i popušteni.

Ovi čelici imaju viši maseni udio ugljika od konstrukcijskih čelika (0,8 – 2,03 % C), a isporučuju se u toplo valjanom, hladno vučenom, kovanom ili lijevanom stanju, u obliku šipki, traka i ploča.

Alatni čelici mogu biti nelegirani, niskolegirani i visokolegirani.

Osnovna podjela alatnih čelika je prema radnoj temperaturi i uvjetima primjene, pa tako razlikujemo sljedeće tri podskupine:

- a) alatni čelici za hladni rad (radne temperature do 200 °C);
- b) alatni čelici za topli rad (radne temperature preko 200 °C);
- c) brzorezni čelici.

Danas su također razvijeni i sinterirani alatni čelici.

3.6.2. Svojstva alatnih čelika

Zahtjeve na svojstva alatnih čelika može se podijeliti u dvije grupe: primarni (temeljni) zahtjevi, te proizvodni i ekonomski (sekundarni) zahtjevi. [1]

Primarni zahtjevi su:

- otpornost na trošenje;
- udarna izdržljivost – žilavost;
- otpornost na popuštanje – specifično za čelike koji su namijenjeni za rad pri povišenim temperaturama.

Sekundarni zahtjevi su:

- obradljivost odvajanjem čestica (reznost);
- što viša zakaljivost;
- što viša prokaljivost;
- što manja sklonost pogrubljenju zrna kod austenitiziranja;
- što manja promjena mjera u radu;
- što manje deformacije kod kaljenja;
- sigurnost od pojave napuklina i lomova kod provođenja postupaka toplinske obrade i što manja sklonost razugljičenju;
- prikladnost za poliranje;
- otpornost na koroziju;
- nabavljivost;
- prihvatljivost cijene.

Otpornost na trošenje – većina alata dotrajava upravo zbog trošenja, a uglavnom se radi o abrazijskom trošenju „mikrorezanjem“ i upravo je zbog toga otpornost na trošenje primarni zahtjev pri izboru alatnih čelika. Pri abrazijskom trošenju, tvrde čestice koje abradira-

ju alat mogu biti: karbidi u obrađivanom predmetu, nečistoće u obrađivanom predmetu, tvrdi intermetalni spojevi, tvrdi organski spojevi, ili tvrda punila u polimerima. S obzirom da je otpornost na abrazijsko trošenje funkcija mikrostrukturnog stanja čelika, traži se: martenizitna mikrostruktura sa što višom tvrdoćom i što viši udio kvalitetnih karbida. Kod alata dolazi i do adhezijskog trošenja, tj. navarivanje čestica obrađivanog metala na oštricu ili na radnu plohu alata. Mjere za sprječavanje ovog oblika trošenja su: dovoljno visoka granica razvlačenja i onemogućavanje čistog metalnog kontakta (dobrim podmazivanjem ili putem termokemijske obrade).

Žilavost – Alati, osim zbog trošenja, često stradavaju i zbog napuklina ili loma. S obzirom da se od alata traži što viša tlačna opteretivost u radu, bolje je da čelik ima visoku granicu razvlačenja, nego visoku duktilnost. Visoka žilavost se traži od udarno opterećenih alata (čekići, dlijeta), uz zadržavanje dovoljne otpornosti na trošenje i popuštanje. Uglavnom, optimalna duktilnost – žilavost čelika se postiže pravilnim popuštanjem.

Otpornost na popuštanje – Ovaj je zahtjev bitan za alate koji rade pri visokim temperaturama, kao što su kokile ili ukovnji, ili za alate koji u radu razvijaju visoke temperature (reznici alati). Otpornost na popuštanje se iskazuje preko razlike vrijednosti tvrdoće nakon kaljenja i tvrdoće nakon popuštanja kod određene temperature, što se naziva **dekrement tvrdoće**. Te se tvrdoće očitavaju iz dijagrama popuštanja za pojedinu vrstu čelika. Najveću otpornost na popuštanje pokazuju alatni čelici za topli rad i brzorezni čelici. Kod kalupa za topli rad, vrlo je važna otpornost na toplinski umor, kao posljedica promjena toplinskih naprezanja uslijed cikličkih ugrijavanja i ohlađivanja alata.

3.6.3. Postupci toplinske obrade alatnih čelika

Postupci modificiranja mikrostrukture, ili nanošenja novih slojeva, primjenjuju se kako bi se poboljšala svojstva površine alata. To su postupci:

- a) Površinsko kaljenje (plameno, indukcijsko, lasersko, kaljenje elektronskim snopom, impulsno).
- b) Termokemijski postupci (cementiranje, nitriranje, karbonitriranje, boriranje, difuzija metalnih elemenata).
- c) Tvrdo elektrokemijsko kromiranje, kojim se smanjuje faktor trenja, povisuje se otpornost na adhezijsko trošenje i kiseline.
- d) Postupci nanošenja karbida, nitrida, karbonitrida i oksida iz parne faze (CVD i PVD), kojima se stvaraju jedan ili više tankih slojeva, koji su otporni na abrazijsko i adhezijsko trošenje.
- e) Postupci nanošenja dijamantnih slojeva (DLC = Diamond Like Carbon).

3.6.4. Alatni čelici za hladni rad

To su nelegirani i niskolegirani čelici, koji se primjenjuju do radnih temperatura od 200 °C.

Nelegirani alatni čelici za hladni rad

Ovi čelici sadrže od 0,5 do 1,3 % C; što je viši postotak ugljika u čeliku, to je viša tvrdoća, a niža žilavost i obratno. S obzirom da ovi čelici nisu legirani, imaju nisku prokaljivost i bolju žilavost u odnosu na druge alatne čelike. Najjeftiniji su od svih alatnih čelika i proizvode se različitih dimenzija. Od njih se izrađuju alati jednostavnijeg oblika i manjih presjeka, kao što su: dlijeta, čekići, svrdla, kliješta i drugo.

Trenutno zauzimaju oko 10 % udjela u ukupnoj masi proizvedenih alatnih čelika, a treba također naglasiti da su lako obradivi odvajanjem čestica i dobro zavarljivi.

Prema mikrostrukтури, odnosno postotku ugljika, ovi čelici mogu biti: podeutektoidni (do 0,8 % ugljika – feritno perlitni); eutektoidni (0,8 % ugljika – perlitni i nadeutektoidni (više od 0,8 % ugljika – perlitno cementitni).

Tipične vrste čelika iz ove skupine su: C45U (Č1540), C80U (Č1840), C105U (Č1940), 100V2 (Č1941), C110U (Č1946), C125U (Č1943), C135U (Č1948).

Niskolegirani alatni čelici za hladni rad

Osnovni razlozi zbog kojih se legiraju ovi čelici su: povišenje prokaljivosti, te dobivanje kvalitetnijih i toplinski postojanijih karbida (od Fe_3C), koji daju višu tvrdoću i otpornost na trošenje. U usporedbi s drugim alatnim čelicima, ovi čelici imaju srednju otpornost na trošenje i žilavost, kao i nisku otpornost na popuštanje. Zato se legiranjem postižu bolja svojstva i to: povišenje žilavosti, konstantna visoka tvrdoća pri povišenim radnim temperaturama i dobra dimenzijska postojanost.

Niskolegirani alatni čelici za hladni rad, podijeljeni su u sljedeće **podskupine**:

- a) Visokougljični W-V čelici: 100WV4 (Č6842), 120WV4 (Č6840), 110WCrV5 (Č6441), 142WV13 (Č6850). To su nadeutektoidni čelici, koji imaju visoku otpornost na trošenje, a krom je element koji povisuje prokaljivost. Najpoznatiji iz ove skupine je „srebrnasti čelik“ (120 WV4).
- b) Niskougljični i srednjeugljični W-Cr-(Si)-V čelici: 45WCrV7 (Č6443), 60WCrV7 (Č6444), 80WCrV8 (Č6445). Ova podskupina čelika ima visoku otpornost na udarna opterećenja, zbog niskog masenog udjela ugljika. Elementi volfram i krom dobro djeluju na otpornost na trošenje i na prokaljivost.
- c) Niskolegirani Cr-čelici: 100Cr6 (Č4145), 115CrV3 (Č4141), 140Cr3 (Č4143), 105Cr4 (Č4142), 100Cr6 (Č4146), 100CrMn6 (Č4340). Koriste se za izradu alata i dijelova kotrljajućih ležaja. Ovi čelici su otporni na trošenje, nadeutektoidnog su sastava i otporni su na visoke specifične pritiske.
- d) Niskolegirani Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici: 90MnCrV8 (Č3840) i 105WCr6 (Č6440). Ova podskupina čelika ima dobru otpornost na trošenje i visoku žilavost, a primjenjuju se za kalibre, granične mjerke, mikrometerske vijke, kutnike i sl.

Visokolegirani alatni čelici za hladni rad

Kod ove skupine alatnih čelika, krom je glavni legirni element, a ima ga više od 5 %. Krom je element kojim se postiže visoka otpornost na koroziju. Ostali legirni elementi su vanadij, molibden i volfram.

Primjeri čelika iz ove skupine su: X100CrMoV5-1 (Č4756), X210Cr12 (Č4150), X42Cr13 (Č4173).

3.6.5. Alatni čelici za topli rad

Najznačajnije svojstvo koje se zahtijeva od alatnih čelika za topli rad je **otpornost na popuštanje**, zbog toga što su radne temperature kojima su izloženi ovi materijali veće od 200 °C. Upravo zbog dužeg rada pri visokim temperaturama, dolazi do pada tvrdoće, promjena mikrostrukture i toplinskog umora.

Neki alati za topli rad moraju ispuniti i dodatne zahtjeve, kao što su: otpornost na trošenje, otpornost na intenzivnu oksidaciju, otpornost na pojavu plastičnih deformacija i dovoljna žilavost (otpornost na udarno opterećenje), kao i otpornost na razugličenje.

Dobra žilavost i otpornost na toplinski umor postižu se niskim masenim udjelom ugljika, dok se otpornost na popuštanje postiže legiranjem (legirni elementi kod alatnih čelika za topli rad su: W, Mo, Cr, V, Ni).

Toplinska obrada ove skupine alatnih čelika sastoji se od austenitizacije i popuštanja.

Prema sastavu i primjeni, alatni čelici za topli rad uobičajeno se dijele u sljedeće tri podskupine:

- a) Niskolegirani čelici za ukovnje: 56NiCrMoV7 (Č5742), 55NiCrMoV6 (Č5741);
- b) Visokolegirani čelici s oko 5 % Cr i 1 – 3 % Mo za kalupe za tlačni lijev: X32CrMoV3-3 (Č7450), X38CrMoV5-1 (Č4751), X40CrMoV5-1 (Č4753), X50CrMoV5-1 (Č4757);
- c) Visokolegirani W-Cr-V čelici za kalupe za tlačni lijev: X30WCrV4-1 (Č6450), X30WCrV9-3 (Č6451).

3.6.6. Brzorezni čelici

Brzorezni čelici su legirani s elementima – jakim karbidotvorcima: Cr, W, V, Mo; koji s povišenim udjelom ugljika (0,7 – 1,3 %) stvaraju karbide postojane pri visokim temperaturama. Ovi čelici su predviđeni za rad u uvjetima povišene i visoke temperature oštice, odnosno za rezanje velikim brzinama.

Zbog svog sastava i mikrostrukture, glavne odlike brzoreznih čelika su **visoka otpornost na trošenje i otpornost na popuštanje pri visokim radnim temperaturama (500 – 600 °C)**, ali zbog toga niska žilavost. Koriste se za rezne alate koji rade s velikim brzinama rezanja, a zbog visokog stupnja legiranosti, brzorezni čelici su najskuplji od svih alatnih čelika.

Naime, u današnje vrijeme su postupci obrade odvajanjem čestica najčešće korišteni postupci obrade metala u proizvodnji. Uvođenjem sve viših parametara rezanja, postiže se visoka produktivnost, ali istovremeno postoji rizik od pogoršanja kvalitete površine i vijeka trajanja alata. Zbog svega navedenog, optimalan materijal za izradu reznog alata mora imati adekvatna svojstva.

Također je važna **toplinska obrada brzoreznih čelika**. Provodi se predgrijavanje u tri stupnja, zbog niske toplinske vodljivosti ove skupine alatnih čelika i zbog njihove osjetljivosti na nagle temperaturne promjene. Slijedi držanje na temperaturi austenitiziranja i hlađenje s te temperature i to u solnoj kupki, u ulju ili na zraku. Za provođenje postupaka toplinske obrade brzoreznih čelika, treba imati posebnu opremu (niz solnih kupki ili vakuumsku peć).

Vrste brzoreznih čelika:

- a) Čelici s 18 % W: HS18-0-1 (Č6880), HS18-1-2-5 (Č6980), HS18-1-2-10 (Č9682);
- b) Čelici s 12 % W: HS12-1-4 (Č6881), HS12-1-2 (Č6882), HS12-1-2-5 (Č6981), HS12-1-4-5 (Č9681);
- c) Čelik s 10 % W: HS10-4-3-10 (Č9683);
- d) W-Mo-čelici: HS6-5-2 (Č7680), HS6-5-2-5 (Č9780);
- e) Mo-čelik: HS2-9-1 (Č7880).

3.6.7. Sinterirani alatni čelici

Istraživanje i razvoj različitih procesa te laboratorijskih metoda sinteriranja započeli su početkom 20. stoljeća znanstvenici poput Moissona, Troosta, Wedekinda i dr. Spomenuti istraživači predstavljaju začetnike nove industrijske discipline – metalurgije praha (engl. **Powder Metallurgy** – PM).

Današnji suvremeni materijali dobivaju se optimiranjem sastava i mikrostrukture materijala prema željenim svojstvima. Metalurgija praha pruža velike mogućnosti za ostvarenje takvog pristupa proizvodnji materijala i različitih dijelova strojeva.

Metalurgija praha obuhvaća ne samo proizvodnju metala u obliku praha nego i nemetalnih prahova, te oblikovanje dijelova iz takvih prahova postupkom sinteriranja, odnosno srašćivanja.

Intenzivniji razvoj metalurgije praha počeo je proizvodnjom i uporabom “tvrdih metala”, a posljednjih godina prolazi kroz razdoblje značajnijeg napretka.

Danas se postupcima metalurgije praha mogu postići jednaka ili bolja svojstva od tradicionalnih postupaka oblikovanja metala. Postupci oblikovanja praha danas se također primjenjuju u proizvodnji keramike i metalnih kompozita.

Postupci sinteriranja čelika razvijeni su nakon usavršavanja postupaka sinteriranja tvrdih metala (npr. karbidi + Co, karbidi + Ni) i keramičkih materijala.

Sinterirani čelici postižu potpunu izotropiju strukture, svojstava i vlastitih naprezanja prvenstveno zbog primjene praha vrlo malih dimenzija, te vrlo brzog hlađenja, čime se isključuje mogućnost pojave dendritne strukture praha.

Sinterirani alatni čelici su prikladni za termokemijsku obradbu i za obradbu prevlačenjem (PVD, CVD) jer je izotropna struktura znatno povoljnija za difuziju od anizotropne, a glavna negativna karakteristika svih metala nastalih postupkom sinteriranja je njihova visoka krhkost.

4. ŽELJEZNI LJEVOVI

4.1. Uvodno o željeznom lijevu

Lijev je metalna legura koja nakon ulijevanja u kalup i skrućivanja (kristalizacije) nije bila podvrgnuta toplom ili hladnom oblikovanju deformiranjem. [4] Ljevovi se koriste onda kada tehnički nije izvedivo oblikovanje na neki drugi način, pa se to uglavnom odnosi na dijelove složenih oblika i velikih dimenzija (postolja i kućišta strojeva i sl.). Također treba reći da su ljevovi jeftiniji od običnih čelika, jer je cijena sirovog željeza za proizvodnju ljevova niža od cijene sirovine za dobivanje čelika.

U širem smislu, željezni ljevovi se dijele na: čelične ljevove (ako je postotak C < 2,03 %) i bijele, odnosno sive ljevove (ako je postotak C > 2,03 %). Općenito, ljevove možemo svrstati u skupine, kako je prikazano u nastavku.

Skupine željeznih ljevova:

- a) čelični lijev (ČL);
- b) bijeli tvrdi lijev (BTL);
- c) sivi lijev (SL);
- d) nodularni – žilavi lijev (NL);
- e) temper – kovkasti lijev (crni feritni CTCL, crni perlitni PTEL i bijeli (BTCL).

Ljevovi se mogu sistematizirati prema: mehaničkim svojstvima, tehnološkom postupku dobivanja, prema kemijskom sastavu i prema mikrostrukturi.

Čelični lijev pripada skupini ljevova s malim masenim udjelom ugljika (do 0,5 %), dok temper lijev, bijeli tvrdi lijev, sivi lijev i nodularni lijev pripadaju u skupinu ljevova s visokim masenim udjelom ugljika (2,2 – 4,5 %).

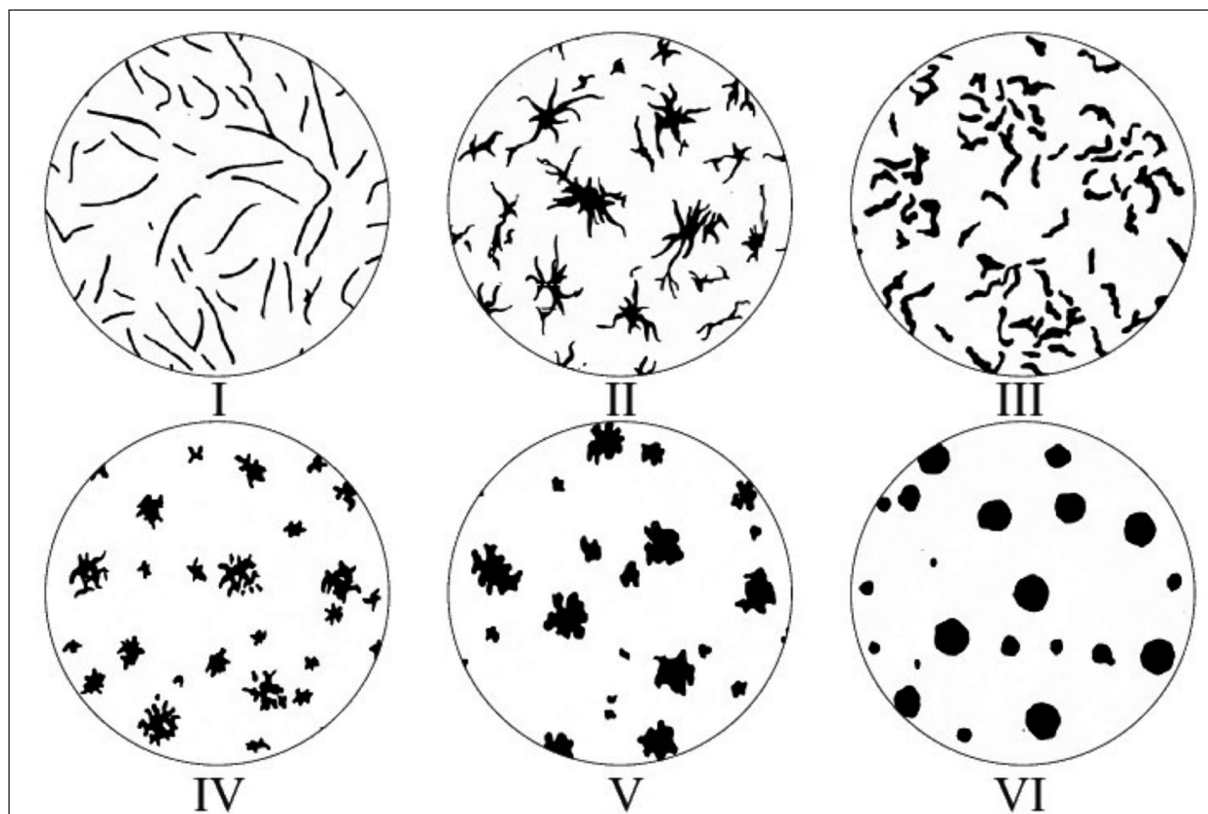
Mikrostruktura se odnosi na vrstu kristalizacije, gdje se razlikuju tri stanja:

- a) metastabilna kristalizacija (ugljik je vezan u cementitu);
- b) stabilna kristalizacija (ugljik je samo u obliku grafita);
- c) mješovita (stabilna/metastabilna) kristalizacija (ugljik je i u obliku grafita i u obliku cementita).

Grafit se pojavljuje u tri osnovna oblika, a to su: listićav ili lamelaran (kod sivog lijeva), kuglast (kod nodularnog lijeva) i čvorast (kod temper lijeva).

Osim ova tri osnovna oblika, postoji još i poseban oblik listićavog grafita, koji se naziva **vermikularni** (prema lat. vermicula, što znači crv).

Klasifikaciju grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:2002 prikazuje Slika 4.1.



Slika 4.1: Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:20029 [9]

4.2. Čelični ljev

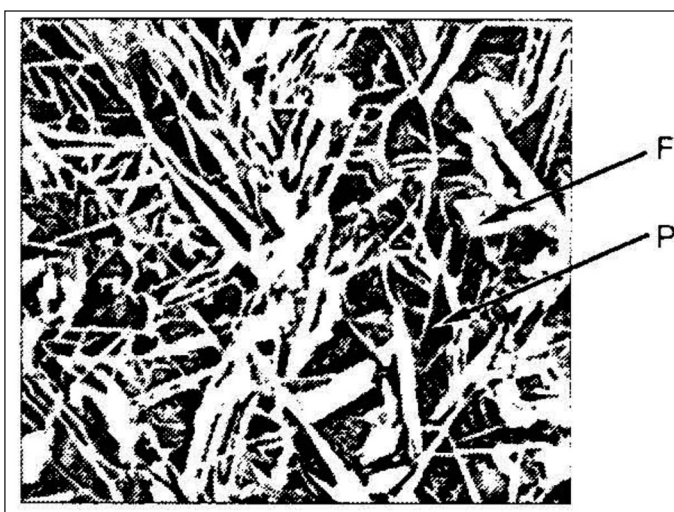
Čelični ljev je Fe-C legura, s manje od 2 % C, koja kristalizira metastabilno, a nakon lijevanja u kalup nije toplo oblikovana (valjana, kovana).

U današnje vrijeme, čelični ljev se najčešće tali u elektrolučnim ili u indukcijskim pećima. Šarža se sastoji od bijelog sirovog željeza, čelične lomljevine i ferrolegura, kojima se regulira sastav čeličnog lijeva. Također se kao dodatak u elektrolučnu peć dodaje vapno. Odljevci od čeličnog lijeva se vrlo rijetko koriste odmah nakon lijevanja, jer gruba ljevačka Widmannstättenova mikrostruktura (feritno-perlitna), daje nisku istezljivost i žilavost.

Ta struktura je prikazana na Slici 4.2.

Čelični ljev se primjenjuje ako nije dovoljna čvrstoća sivog i temper lijeva, zatim za vrlo velike dimenzije i mase i ako je neophodno primijeniti visokougljične, visokolegirane vrste otporne na trošenje, koje se zbog slabe oblikovljivosti deformiranjem moraju lijevati.

Dijelovi koji se izrađuju iz čeličnog lijeva imaju višu cijenu od onih izrađenih od sivog ili temper lijeva, zato što se postavljaju visoki zahtjevi na čistoću i sastav taljevine, kao i zbog visokog tališta i potrebne naknadne toplinske obrade.



Slika 4.2: Widmannstättenova mikrostruktura čeličnog lijeva [1]

Vrste nelegiranog i legiranog čeličnog lijeva se klasificiraju na temelju vrijednosti vlačne čvrstoće i ostalih mehaničkih svojstava, dok kemijski sastav nije zajamčen.

Primjeri primjene čeličnog lijeva su odljevci velikih dimenzija i mase, kao što su: dijelovi preša, kućišta ventila, veliki zupčanici i lančanic, rotor toplinskih strojeva i sl.

Toplinska obrada čeličnih odljevaka

Svrha toplinske obrade je osigurati potrebna svojstva čeličnom odljevku.

Normalizacijom se čeličnom odljevku treba usitniti i izjednačiti zrna, a ovaj postupak toplinske obrade se provodi tako da se podeutektoidni odljevak ugrije do temperature malo iznad A_3 , dok se nadeutektoidni ugrije malo iznad A_1 , te se u svrhu pothlađivanja ohladi na zraku.

Sfeoridizacijsko (meko) žarenje ima zadatak dovesti strukturu čeličnog lijeva u oblik kuglastog karbida u feritu. Naime, ovaj strukturni oblik kod ljevova s više od 0,5 % C je optimalan, u pogledu obradljivosti odvajanjem čestica.

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja kod čeličnog lijeva jedan je najvažnijih postupaka toplinske obrade kod ljevova, jer ima za cilj sniziti vlastita naprezanja, koja su nastala pri hlađenju odljevka u kalupu, zatim vlastita naprezanja nakon zavarivanja i vlastita naprezanja kod normalizacije (koja su nastala pri hlađenju na zraku).

Visoko žarenje se izvodi u svrhu namjernog pogrubljenja zrna niskougličnih čeličnih ljevova, jer grubo zrno osigurava poboljšanje obradljivosti odvajanjem čestica.

Ostali postupci toplinske obrade koji se provode kod čeličnog lijeva su: difuzijsko žarenje, poboljšavanje, površinsko kaljenje i termokemijske obrade (cementiranje, nitriranje, boriranje).

Primjeri raznih vrsta čeličnog lijeva prema EN (HRN): GS185N (ČL0300), GS255JRN (ČL0501).

4.3. Bijeli tvrdi lijev

Bijeli tvrdi lijev se dobiva metastabilnom kristalizacijom Fe – C legura s više od 2 % C. Kako bi se spriječila grafitizacija, treba ograničiti postotak silicija, a povisiti postotak cementatora mangana (u odnosu na sivi lijev), kako bi taj element osigurao intenzivnije stvaranje Fe_3C .

Kemijski sastav taljevine je sljedeći: 2,5 – 3,5 % C; < 0,6 % Si; 3 – 4 % Mn; < 0,9 % P; < 0,25 % S.

Na Slici 4.3 prikazana je mikrostruktura bijelog lijeva.

S obzirom na mikrostrukturu po presjeku se razlikuju: potpuno metastabilno kristalizirana mikrostruktura po cijelom presjeku i mješovito kristalizi-



Slika 4.3: Mikrostruktura bijelog lijeva [4]

rana mikrostruktura kod koje su samo površinski slojevi do određene dubine kristalizirali metastabilno, dok je sredina presjeka kristalizirala stabilno ili mješovito. Legiranjem se mogu dobiti i posebne vrste bijelog tvrdog lijeva i to: vrste koje su legirane s Ni i vrste koje su legirane s Cr i Mo.

Svojstva bijelog tvrdog lijeva:

- tvrdoća viša od 400 HV;
- visoka otpornost na abrazijsko trošenje;
- slaba duktilnost;
- neobradljivost odvajanjem čestica.

Bijeli tvrdi ljev se primjenjuje za odljevke jednostavnijeg oblika, koji trebaju biti tvrdi i otporni na abrazijsko trošenje. Bijeli tvrdi ljevovi se mogu taliti u kupolci, ali isto tako i u plamenim ili električnim pećima. Livljivost tvrdog lijeva je slabija od livljivosti sivog lijeva.

Do danas, bijeli tvrdi ljevovi nisu u potpunosti normirani, a od mehaničkih im se svojstava ispituje tvrdoća (HV).

4.4. Sivi ljev

Sivi ljev je željezna legura s više od 2 % C, koja kristalizira mješovito: u primarnoj i prvom dijelu sekundarne kristalizacije pretežno stabilno, a u drugom dijelu sekundarne kristalizacije gotovo samo metastabilno.

Dobiva se pretaljivanjem sivog sirovog željeza i stare lomljvine čelika i lijeva u kupolci.

Sivi ljev nije najkvalitetniji materijal, ali je vrlo često najekonomičniji, zbog toga što nudi optimalan kompromis cijene i svojstava, pa u strojogradnji nalazi široku primjenu.

Kemijski sastav je sljedeći: 2,5 – 4,5 % C; 0,3 – 1,2 % Mn; **1 – 4 % Si**; 0,4 – 1,5 % P; < 0,1 % S.

Dakle, element koji forsira grafitizaciju, kod sivog lijeva je silicij.

Silicij je, naime, jaki grafitizator, koji omogućava stvaranje grafita, iako ohlađivanje nije izuzetno sporo.

Mangan je jaki cementator, koji je koristan zbog stvaranja neškodljivog spoja MnS.

Fosfor je grafitizator koji uglavnom poboljšava livljivost, odnosno bolje popunjavanje kalupa, a općenito je štetan, jer smanjuje žilavost.

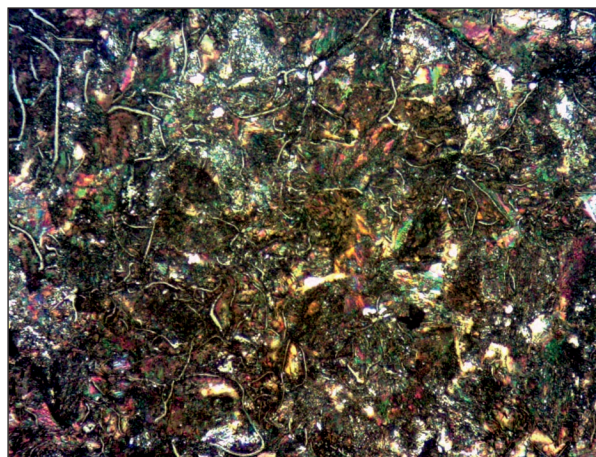
Sumpor je cementator i kao štetna primjesa dolazi nužno iz koksa i sirovine.

Mikrostruktura sivog lijeva je dvojna i sastoji se od: nakupina listića grafita i željezne osnove koja je feritna, perlitna ili feritno-perlitna, a može se pojaviti i slobodni cementit.

Na Slikama 4.4 i 4.5 prikazana je mikrostruktura sivog lijeva SL 250 u poliranom stanju, a onda i nakon nagrizanja.



Slika 4.4: Mikrostruktura sivog lijeva SL 250 (polirano)
[10]



Slika 4.5: Mikrostruktura sivog lijeva SL 250 (nagriženo)
[10]

Svojstva sivog lijeva

Tehnološka svojstva: mogu se ljevati odljevci svih masivnosti, jednostavna i jeftina proizvodnja, dobra livljivost i rezljivost i slaba zavarljivost (zbog visokog postotka ugljika).

Mehanička svojstva: niska vlačna čvrstoća, visoka tlačna čvrstoća, niska istezljivost i slaba žilavost.

Toplinska obrada sivog lijeva

Od postupaka toplinske obrade, kod sivog se lijeva primjenjuju: žarenje za redukciju napetosti, meko žarenje, normalizacija, kaljenje i poboljšavanje.

Klasifikacija sivog lijeva

Prema normama, sivi lijev je kategoriziran na osnovi vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene ispitivanjem na posebno odlivenoj epruveti promjera 30 mm i vrijednosti savojne čvrstoće.

Primjena sivog lijeva je vrlo raširena za odljeve svih masa, kao što su npr. postolja alatnih strojeva, ili pak kućišta motora i reduktora.

Kod daljnjeg razvoja sivog lijeva, razvili su se tzv. cijepljeni ljevovi i to: modificirani sivi lijev, meehanite i vermikularni lijev.

Primjeri raznih vrsta sivog lijeva: EN-GJL100S (SL 10), EN-GJL390S (SL 40).

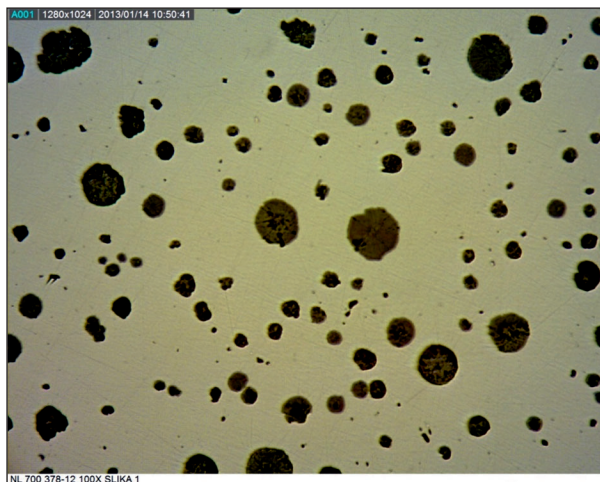
4.5. Nodularni (žilavi) lijev

Nodularni lijev je lijevačka pseudobinarna legura željeza i ugljika, koji se pretežnim dijelom izlučio u obliku kuglastog grafita. [4]

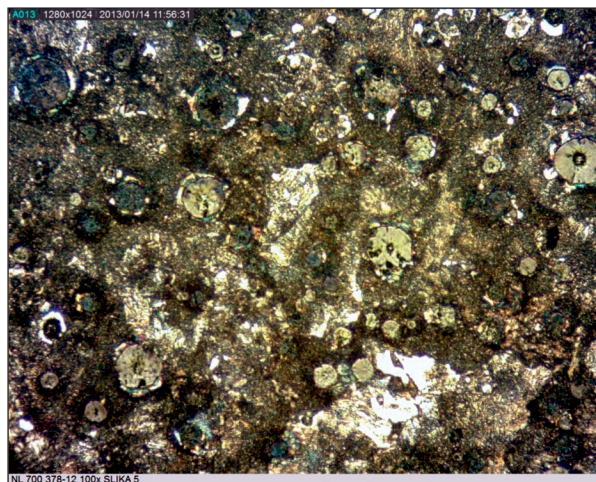
Zasip od specijalnog sivog sirovog željeza se tali u elektropeći, a taljevina se obrađuje elementima globulatorima (0,5 % Mn kod podeutektičkih vrsta i 0,5 % Ce kod nadeutektičkih vrsta), koji pomažu izlučivanje grafita u obliku kuglica (nodula). Nakon toga se taljevina ulijeva u pješčane kalupe. Ovaj postupak dobivanja je složeniji i skuplji, nego kod dobivanja ostalih vrsta ljevova.

Kemijski sastav je sljedeći: 3,2 – 3,8 % C; 2,4 – 2,8 % Si; < 0,5 % Mn; < 0 045 % P; < 0,01 % S.

Mikrostruktura nodularnog lijeva NL 700 prikazana je na Slikama 4.6 i 4.7, prvo u poliranom stanju, a onda i nakon nagrizanja.



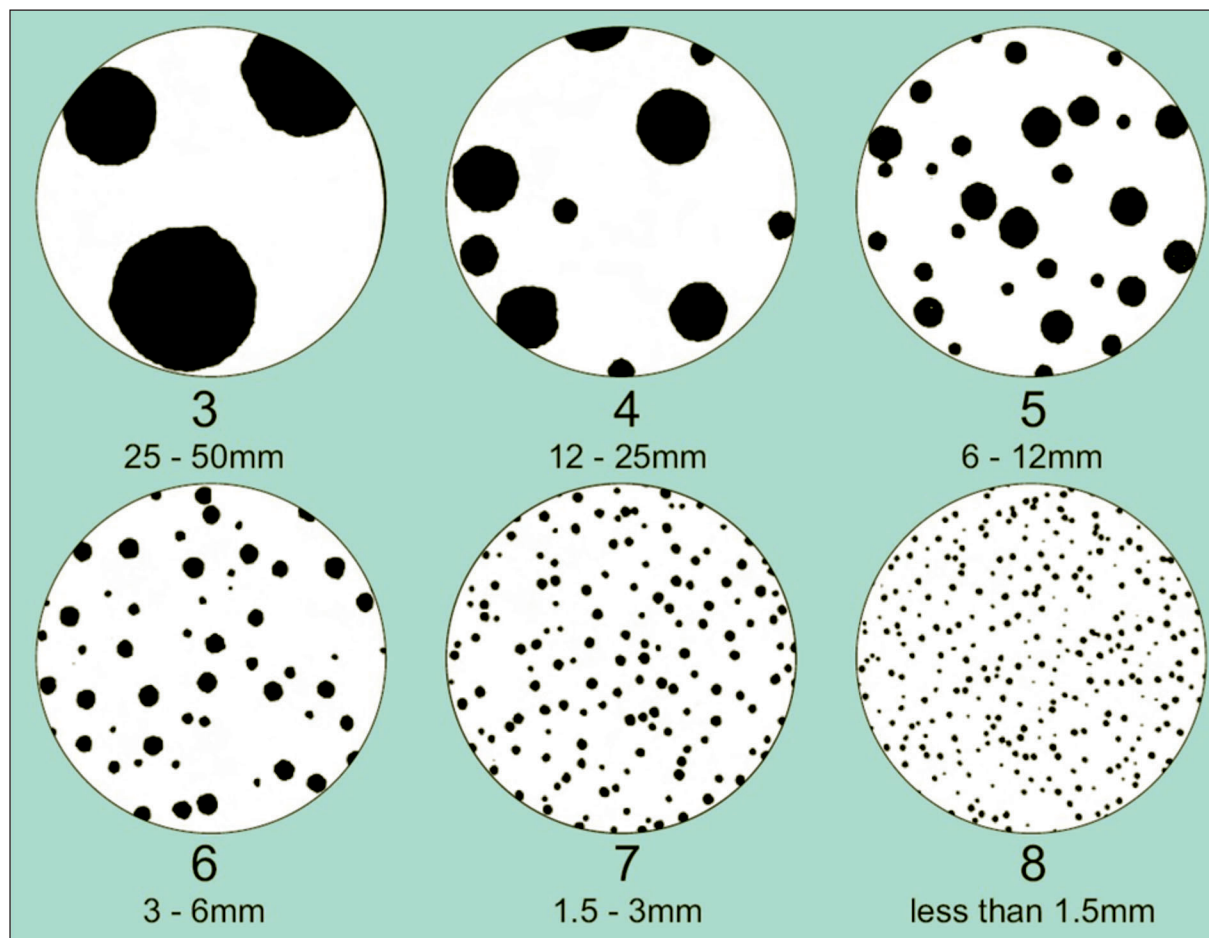
Slika 4.6: Mikrostruktura NL 700 (polirano) [10]



Slika 4.7: Mikrostruktura NL 700 (nagriženo) [10]

Mikrostruktura željezne osnove može biti: potpuno feritna, feritno-perlitna, perlitna ili austenitna. Također treba reći da se mikrostruktura željeznih ljevova promatra u poliranom i nagriženom stanju. U poliranom stanju određuje se oblik, veličina i raspored grafita, dok se nakon nagrizanja vidi mikrostruktura željezne osnove koja okružuje grafit.

Standardne veličine nodula kod nodularnog lijeva prikazuje Slika 4.8.



Slika 4.8: Standardne veličine nodula kod nodularnog lijeva [9]

Svojstva nodularnog lijeva

Mehanička svojstva nodularnog lijeva su bolja od svojstava sivog lijeva, ali slabija od svojstava čeličnog lijeva. Dobro se obrađuje odvajanjem čestica i može se zavarivati.

Otpornost na trošenje, koroziju i oksidaciju je bolja nego kod sivog lijeva s listićavim grafitom. Ima dobra ležišna svojstva, a legiranjem se mogu postići i neka specijalna svojstva, kao što je na primjer otpornost na djelovanje agresivnih medija.

Primjena nodularnog lijeva je za koljenaste i bregaste osovine motora, košuljice cilindara motora i kompresora, zupčanike i slično.

Vrste nodularnog lijeva: EN-GJS-600-3S (NL 600-3), EN-GJS-800-2S (NL 800-2).

Topinska obrada nodularnog lijeva

Od postupaka toplinske obrade, kod nodularnog se lijeva primjenjuju sljedeći postupci:

- a) žarenje za redukciju napetosti;
- b) grafitizacijsko žarenje za eliminaciju Fe_3C slob.;
- c) grafitizacijsko žarenje za postizanje feritne strukture;
- d) normalizacija;
- e) poboljšavanje;
- f) površinsko kaljenje.

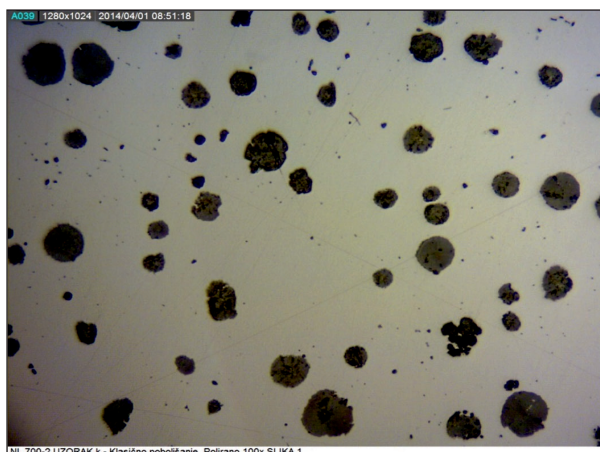
Izotermički poboljšani nodularni lijev (ADI = Austempered Ductile Iron – engl.)

Izotermički poboljšani nodularni lijev predstavlja novu vrstu lijeva, koji zamjenjuje konstrukcijske čelike ili čelični lijev kod onih dijelova kod kojih se traži visoka čvrstoća, istezljivost, žilavost, dinamička izdržljivost i otpornost na trošenje.

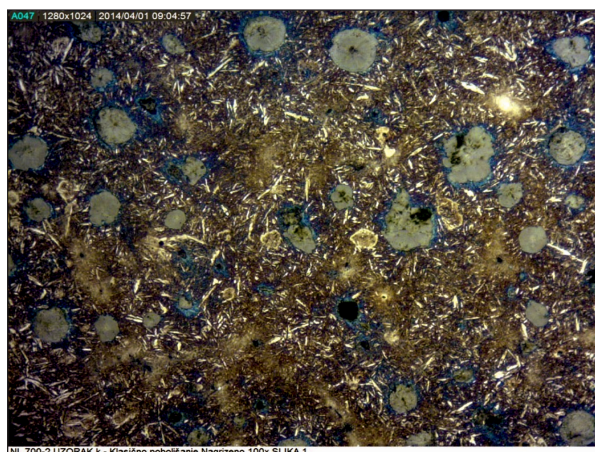
Izotermičko poboljšavanje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$) i brzog hlađenja do temperature izotermičke pretvorbe (obično $200 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) u solnoj kupki i držanja na toj temperaturi, dok se potpuno ne završi pretvorba u bainit. Ohlađivanje teče na zraku.

Primjena ovog lijeva je kod zupčanika i stapajica motora.

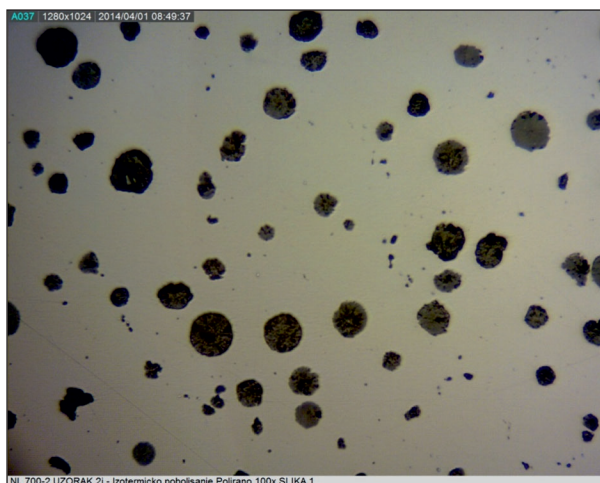
Na Slikama 4.9, 4.10, 4.11 i 4.12 je prikaz mikrostrukture nodularnog lijeva NL 700 nakon klasičnog i izotermičkog poboljšavanja.



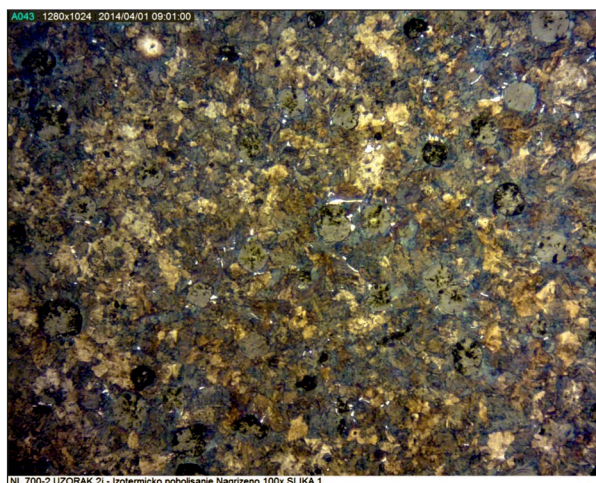
Slika 4.9: Mikrostruktura NL 700 nakon klasičnog poboljšavanja (polirano) [10]



Slika 4.10: Mikrostruktura NL 700 nakon klasičnog poboljšavanja (nagriženo) [10]



Slika 4.11: Mikrostruktura NL 700 nakon izotermičkog poboljšavanja (polirano) [10]



Slika 4.12: Mikrostruktura NL 700 nakon izotermičkog poboljšavanja (nagrizeno) [10]

4.6. Temper (kovkasti) lijev

Temper lijev se dobiva tako da se bijelo kristalizirani lijev (bijeli sirovi lijev) žari tzv. „temper postupkom“, pa time ugljik iz željeznog karbida: ili kristalizira u obliku tzv. temper ugljika, ili se većim dijelom ukloni iz lijeva procesom razugličenja.

Ovisno o atmosferi u kojoj se provodi žarenje, dobiva se:

- a) crni temper lijev (sivi prijelom od grafita, žarenjem u neutralnoj atmosferi) – primjer: EN-GJMB-300-6S (CTEL30-06);
- b) bijeli temper lijev (svjetliji prijelom do ferita i perlita, žarenjem u oksidacijskoj atmosferi) – primjer: EN-GJMW-360-4S (BTEL 35-04).

Sastav odljevaka bijelog lijeva za bijeli temper lijev se razlikuje od sastava odljevaka bijelog lijeva za crni temper lijev, što je prikazano u Tablici 4.1.

Tablica 4.1: Kemijski sastav crnog i bijelog temper lijeva

Kemijski sastav u masenim %					
Vrsta lijeva	C	Si	Mn	P	S
Crni temper lijev	2,8 – 3,4	0,5 – 0,8	0,2 – 0,4	<0,1	0,1 – 0,29
Bijeli temper lijev	2,0-2,8	1,4 – 1,8	0,2 – 0,5	<0,1	<0,15

Sirovina za bijeli temper lijev je jeftinija od one za crni temper lijev.

Crni temper lijev

Tijekom postupka žarenja kojim se dobiva crni temper lijev, ugljik se taloži u nakupine grafita u obliku čvorića.

Crni temper lijev može biti feritni ili perlitni. Zbog visokog udjela ugljika, crni temper lijev je slabo zavarljiv, ali se dobro lemi i bolje se obrađuje odvajanjem čestica, nego bijeli temper lijev.

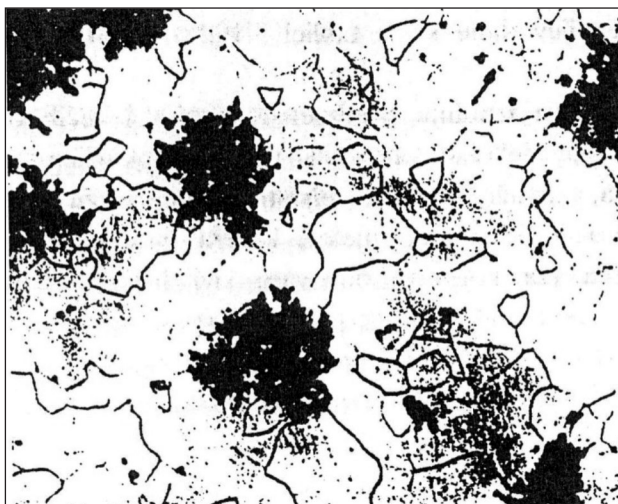
Na Slici 4.13 prikazana je mikrostruktura: crnog temper lijeva s feritnom matricom (čvorići grafita u feritnoj matrici).

Crni temper lijev se primjenjuje za od-ljevke male mase kompliciranih oblika.

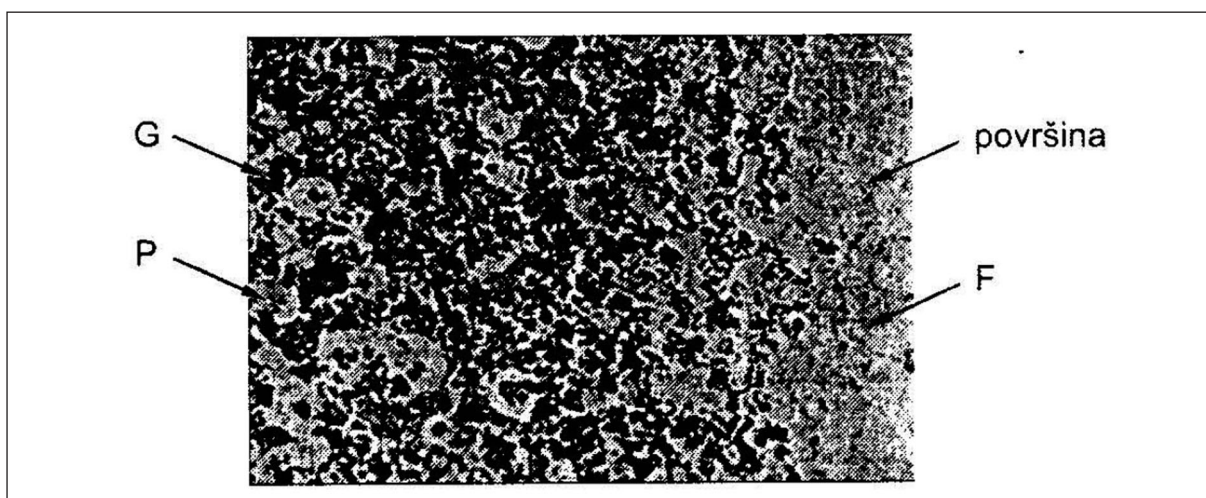
Bijeli temper lijev

Prilikom dugotorajnog žarenja u slabo oksidirajućoj plinskoj atmosferi, ili u granu-latu, ugljik iz površinskih slojeva se veže s kisikom iz okoline, izgara i izlazi iz peći u obliku CO_2 . Za pravilno vođenje žarenja, vrlo je važan omjer CO/CO_2 , kako ne bi došlo do oksidacije željeza. Na taj se način razugljičuju slojevi debljine od 4 do 12 mm.

Mikrostruktura bijelog temper lijeva prikazana je na Slici 4.14.



Slika 4.13: Mikrostruktura crnog temper lijeva [4]



Slika 4.14: Mikrostruktura bijelog temper lijeva [1]

Bijeli temper lijev se primjenjuje za ručni alat, cijevne spojnice, lance i sl. zbog toga što se može pocinčavati i cementirati.

Popis dijagrama, slika i tablica

Dijagrami

Dijagram 3.1: Dijagram stanja Fe-C za metastabilnu kristalizaciju	15
Dijagram 3.10: Dijagram puzanja	39
Dijagram 3.2: Shematski prikaz struktura u Fe-C dijagramu stanja za metastabilnu kristalizaciju	16
Dijagram 3.3: Dijagram „naprezanje – deformacija”	23
Dijagram 3.4: Postupak cementiranja čelika	27
Dijagram 3.5: Burnsov dijagram	28
Dijagram 3.6: Dijagram postupka poboljšavanja čelika	29
Dijagram 3.7: Jominy krivulja prokaljivosti čelika za poboljšavanje	29
Dijagram 3.8: Dijagrami „naprezanje – istezanje” za meki čelik (lijevo) i čelik za opruge (desno)	31
Dijagram 3.9: Schaefflerov strukturni dijagram	35

Slike

Slika 1.1: Kidalica za ispitivanje čvrstoće materijala	11
Slika 1.2: Metalografski mikroskop	12
Slika 1.3: Spektroskop za analizu kemijskog sastava materijala	12
Slika 2.1: Sistematizacija materijala	13
Slika 3.1: Visoka peć	17
Slika 3.2: Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika	23
Slika 3.3: Feritno-perlitna mikrostruktura sitnozrnatog čelika	26
Slika 3.4: Mikrostruktura Č1531	30
Slika 3.5: Mikrostruktura Č5431	30
Slika 3.6: Korozija tri različite vrste materijala u istom elektrolitu i istom vremenskom periodu	34
Slika 3.7: Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika	36
Slika 3.8: Mikrostruktura Č4172	37
Slika 3.9: Mikrostruktura čelika X22CrMoV12-1	39
Slika 4.1: Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:20029	52
Slika 4.10: Mikrostruktura NL 700 nakon klasičnog poboljšavanja (nagriženo)	57
Slika 4.11: Mikrostruktura NL 700 nakon izotermičkog poboljšavanja (polirano)	58
Slika 4.12: Mikrostruktura NI 700 nakon izotermičkog poboljšavanja (nagriženo)	58
Slika 4.13: Mikrostruktura crnog temper lijeva	59
Slika 4.14: Mikrostruktura bijelog temper lijeva	59
Slika 4.2: Widmannstättenova mikrostruktura čeličnog lijeva	52
Slika 4.3: Mikrostruktura bijelog lijeva	53
Slika 4.4: Mikrostruktura sivog lijeva SL 250 (polirano)	55

Slika 4.5: Mikrostruktura sivog lijeva SL 250 (nagriženo)	55
Slika 4.6: Mikrostruktura NL 700 (polirano)	56
Slika 4.7: Mikrostruktura NL 700 (nagriženo)	56
Slika 4.8: Standardne veličine nodula kod nodularnog lijeva.	56
Slika 4.9: Mikrostruktura NL 700 nakon klasičnog poboljšavanja (polirano)	57

Tablice

Tablica 1.1: Materijali kroz povijest	9
Tablica 3.1: Najviši dopušteni sadržaji legirnih elemenata u nelegiranim čelicima prema EN 10020	20
Tablica 4.1: Kemijski sastav crnog i bijelog temper lijeva	58

Popis oznaka

M_s = martensite start – temperatura početka stvaranja martenzita

$R_{p0,2}$ = konvencionalna granica razvlačenja; N/mm²

R_m = vlačna čvrstoća; N/mm²

σ = naprezanje; N/mm²

ε = deformacija – istezanje; mm/mm, %

t, T = temperatura; °C, K

C_e = ugljični ekvivalent

R_e = granica razvlačenja (tečenja, elastičnosti); N/mm²

R_k = granica loma/kidanja; N/mm²

A_5 = istezljivost; %

KV / KU = udarni rad loma po Charpyju za epruvetu s «V» ili «U» urezom; J

A_1, A_3 = temperature pretvorbi (stojišta); °C, K

HRC = tvrdoća prema Rockwellu

HB = tvrdoća prema Brinellu

HV = tvrdoća prema Vickersu

Cr_e = krom ekvivalent

Ni_e = nikal ekvivalent

α, β, γ = kristali (alfa, beta, gama)

δ = delta ferit

Tr = radna temperatura; °C, K

T_t = temperatura tališta; °C, K

BCC = prostorno centrirana kubična rešetka

s = površina poprečnog presjeka; mm²

FCC = plošno centrirana kubična rešetka

HCP = heksagonski gusto slagana rešetka

A = austenit

M = martenzit

F = ferit

B = bainit

L = ledeburit

P = perlit

K = karbid

G = grafit

Fe_3C = cementit

T = taljevina (faza)

E = eutektik (faza)

E = modul elastičnosti; N/mm²

ρ = gustoća; kg/m³

α = toplinska rastezljivost; 1/K

λ = toplinska vodljivost; W/mK

Z = kontrakcija poprečnog presjeka; %

t = vrijeme; s, min, h

F = sila; N

G = električna vodljivost; m/Ωmm²

Č = čelik

ČL = čelični lijev

DS = djelotvorna suma elemenata

G = modul smika; N/mm²

Literatura

- [1] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J. 2002. *Svojstva i primjena materijala*. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb.
- [2] Novosel M.; Krumes D. 1995. *Željezni materijali II dio: Konstrukcijski čelici*. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu. Slavonski Brod.
- [3] Novosel M.; Cajner F.; Krumes D. 1996. *Alatni materijali*. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu. Slavonski Brod.
- [4] Novosel M.; Krumes D. 1997. *Željezni materijali (metalografske osnove i tehnička primjena željeznih ljevova)*. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu. Slavonski Brod.
- [5] Krumes D. 2000. *Toplinska obradba*. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu. Slavonski Brod.
- [6] Stupnišek M.; Cajner F. 2001. *Osnove toplinske obradbe metala*. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb.
- [7] Sonički N. 2013. *Tehnički materijali*. Veleučilište u Karlovcu. Karlovac.
- [8] Pomenić L. 2009. *Zaštita materijala* (nastavni materijal). Sveučilište u Rijeci. Tehnički fakultet. Rijeka.
- [9] HRN EN ISO 945:2002 – Hrvatski normativni dokument.
- [10] *Interna dokumentacija Veleučilišta u Karlovcu*. Karlovac.
- [11] Kožuh S. 2010. *Specijalni čelici*. Sveučilište u Zagrebu. Metalurški fakultet. Sisak.
- [12] Franz M. 1998. *Mehanička svojstva materijala*. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb.
- [13] Pomenić L. *Materijali I* (nastavni materijal). Sveučilište u Rijeci. Tehnički fakultet. Rijeka.
- [14] Ashby M. F. 2005. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3th ed. Bitterworth – Heinemann. Oxford.
- [15] Huang S. J. i dr. Tribological properties of the low-carbon steels with different micro-structure processed by heat treatment and severe plastic deformation. *Wear* 271 (2011) 705-711.
- [16] Mhaede M. Influence of surface layer properties, fatigue and corrosion fatigue performance of AA7075 T73. *Materials and Design* 41 (2012) 61-66.
- [17] Shreir L. 1987. *Corrosion*, Vol. 2. Newnes-Butterworths. London-Boston.

