



Radni materijal: Toplinska obrada metalnih materijala



www.esf.hr



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.



Sadržaj

1.	Uvod	4
2.	Proizvodnja i prerada čelika	5
2.1.	Označavanje čelika prema hrvatskim i europskim normama	8
2.1.1.	Označavanje čelika prema hrvatskoj normi HRN C.B0.002	8
2.1.2.	Osnovna oznaka	8
2.3.1.1	Osnovna oznaka za čelike s nezajamčenim kemijskim sastavom	8
2.3.1.2	Osnovna oznaka za nelegirane čelike sa zajamčenim kemijskim sastavom	9
2.3.1.3	Osnovna oznaka za legirane čelika sa zajamčenim kemijskim sastavom	10
2.3.1.4	Dopunska oznaka	10
2.3.2.	Označavanje čelika prema europskoj normi EN 10027-1	11
2.1.2.1.	Glavne oznake	11
2.1.2.2.	Dodatne oznake za čelik	12
2.1.2.3.	Dodatne oznake za čelični proizvod	12
3.	Fe-C dijagram stanja za metastabilnu kristalizaciju	16
3.1.1.	Pojavni oblici C u legurama Fe- C	16
3.1.2.	Fe- C dijagram stanja za metastabilnu kristalizaciju	17
3.1.3.	Utjecaj legiranih elemenata na Fe-C dijagrama	20
3.1.3.1.	Svrha legiranja čelika	20
3.1.4.	Utjecaj legiranih elemenata na oblik dijagrama stanja Fe-C	21
4.	Osnovni pojmovi toplinske obrade metala	23
4.1.	Dijagram postupka toplinske obrade	23
4.1.1.	Grijanje	24
4.1.2.	Držanje	25
4.1.3.	Oхлаđivanje	25
4.2.	Postupci toplinske obrade metala	25
4.2.1.	Kaljenje čelika	25
4.2.2.	Izbor temperature austenitizacije (9a):	29
4.3.	TTT- dijagrami	30
4.3.1.	TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje	30
4.3.2.	Izotermički TTT-dijagrami	32
4.4.	Kaljenje sa slomljenim gašenjem	33
4.5.	Stepenasto kaljenje	33
5.	Popuštanje čelika	35



6.	POBOLJŠAVANJE	37
7.	POSTUPCI ŽARENJA	37
7.1.	Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja	38
7.2.	Rekristalizacijsko žarenje.....	39
7.3.	Sferoidizacijsko (meko) žarenje.....	39
7.4.	Normalizacijsko žarenje.....	40
7.5.	Žarenje na grubo zrno (visokotemperaturno žarenje).....	40
7.6.	Homogenizacijsko (difuzijsko) žarenje	41
7.7.	Precipitacijsko očvršćivanje (očvršćivanje izlučivanjem)	41
8.	Ispitivanje materijala	42
8.1.	Ispitivanje tvrdoće	42
8.1.1.	Statička metoda mjerenja tvrdoće- Brinellova metoda.....	42
8.1.2.	Statička metoda mjerenja tvrdoće- Vickersova metoda.....	43
8.2.	Statička metoda mjerenja tvrdoće- Rockwellova metoda.....	44
8.2.1.	Rockwellova HRB- metoda.....	45
8.2.2.	Rockwellova HRC- metoda.....	45
8.2.3.	Dinamičke metode mjerenja tvrdoće- Poldi metoda	46
8.2.4.	Dinamičke metode mjerenja tvrdoće - Shore metoda.....	47
	Literatura.....	48
	Kazalo slika.....	49
	Slika 11: Dijagram postupka kaljenja čelika s kontinuiranim gašenjem 24	49
	Slika 18: Prikaz kontinuiranog ohlađivanja jednog austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika u pripadnom TTT-dijagramu 30	49
	Slika 19: Izotermički TTT-dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika 31	49
	Kazalo tablica	51
	Kazalo grafova.....	
	Popis ključnih pojmova.....	52
	Impresum.....	53



1. Uvod

Čelik je najvažniji konstrukcijski materijal i pokazatelj je stupnja industrijskog razvoja zemalja i regija, a iskazuje se potrošnjom čelika po glavi stanovnika. Čelici su legure željeza i ugljika uz eventualni dodatak jednog ili više legirnih elemenata. Razvijene su mnoge tehnologije proizvodnje kojima se proizvode konstrukcijski čelici visoke čvrstoće koji se temelje na primjeni više vrsta mehanizama očvršćuća. Kod proizvodnje alatnih čelika razvijene su tehnologije pretaljivanja radi dodatnog pročišćavanja čelika od štetnih primjesa, koje i u malim koncentracijama štetno djeluju na svojstva čelika. Razvijene su i tehnologije proizvodnje alatnih čelika postupkom metalurgije praha (PM) kod kojih se rastopljen čelik plinskom atomizacijom pretvara u metalni prah mikrometarske veličine, a zatim se toplo izostatski preša u čelični blok ujednačenog sastava, mikrostrukture i svojstava bez segregacije sastava i strukture, što je uobičajeno za čelike proizvedene konvencionalnim postupcima. U prošlom stoljeću su se posebno intenzivno razvijali postupci proizvodnje čelika, i do sada je razvijeno nekoliko tisuća normiranih vrsta, zahvaljujući velikom broju kombinacija udjela ugljika i velikom broju različitih legirnih elemenata i postupaka termomehaničkih i toplinskih obrada. Čelici se daju lijevati, zavarivati i oblikovati deformiranjem. Oni su proizvod tzv. crne metalurgije koja je značajna gospodarska grana mnogih razvijenih zemalja. Čelici su najzastupljeniji tehnički materijali u svjetskom gospodarstvu, a u skupini metalnih materijala njihova primjena je oko 90 %. Zahvaljujući primjeni velikog broja legirnih elemenata, pored različitih sadržaja ugljika, i primjenom različitih postupaka toplinskih obrada, postiže se velik broj različitih mikrostrukturnih sastava, a time i različitih svojstava čelika. Tako je razvijeno nekoliko tisuća normiranih vrsta čelika s veoma širokim rasponom eksploatacijskih i tehnoloških svojstava, čime se širi područje primjene na različitim područjima. Osim razvoja novih vrsta čelika, razvijaju se i postupci za poboljšavanje kvalitete postojećih vrsta. Posebice je intenzivan razvoj čelika za konstrukcije kod kojih se zahtijevaju manje mase, što se postiže značajnijim povišenjem eksploatacijskih svojstava, najčešće granice razvlačenja, uz zadovoljavajuća ostala važna svojstva. Zbog velikog broja skupina i vrsta čelika koji se proizvode bitno različitim tehnologijama, nije moguće obuhvatiti sve, nego samo najznačajnije vrste. Čelici su najzastupljeniji metalni materijali u primjeni, kod većine tehničkih disciplina, a zahvaljujući velikom broju vrsta i kvaliteta te varijantama primjene toplinskih obrada, nude i brojne kombinacije mikrostrukture i svojstava.

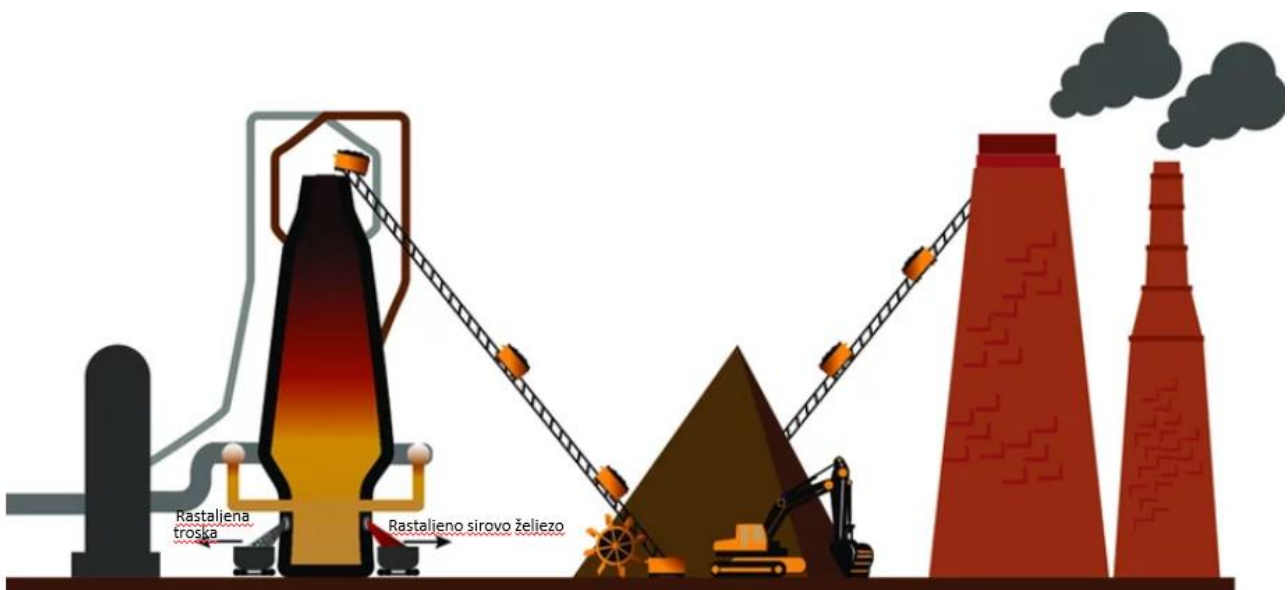
2. Proizvodnja i prerada čelika

Kemijski element željezo (simbol Fe od lat. Ferrum) poznato je već od 2500. godine prije Krista. Po rasprostranjenosti je na zemlji četvrti element, iza kisika, silicija i aluminija. Čisto željezo lako se oblikuje u toplom i hladnom stanju i dobro zavaruje. U prirodi se željezo ne nalazi samorodno, već u obliku minerala (rude). Najvažnije željezne rude su magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), limonit ($\text{FeO}(\text{OH})$), siderit (FeCO_3) i pirit (FeS_2).

Proces proizvodnje sirovog željeza iz rude odvija se u dvije faze:

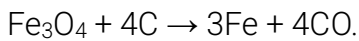
1. faza pripreme rude,
2. faza proizvodnje sirovog željeza iz visoke peći.

Ruda željeza sastoji se od korisnog dijela (sve komponente koje sadrže Fe), pratilaca (različiti elementi vezani s korisnim dijelom) i jalovine (spojevi koji su mehanički vezani uz korisni dio). Priprema željezne rude za metaluršku preradu provodi se fizički (odstranjivanje jalovine, drobljenje, okrupnjavanje) ili kemijski (sušenje, prženje i sl.). Pripremljena ruda zajedno s talioničkim dodatcima i redukcijskim sredstvima dolazi u visoku peć za proizvodnju sirovog željeza. Na slici 1. shematski je prikazana visoka peć. Talionički dodatci (npr. CaCO_3 – za kiselu jalovinu, SiO_2 – za bazičnu jalovinu) tijekom procesa vežu na sebe pepeo i jalovinu iz rude. Tako nastaje lako- taljiva masa manje gustoće od rastaljenog željeza koja se skuplja na površini i ispušta kao troska. Kao redukcijsko sredstvo uglavnom se upotrebljava metalurški koks, a pored toga služi i kao nosilac toplinske energije procesa.



Slika 1. Shematski prikaz visoke peći

Redukcija u visokoj peći odvija se pomoću ugljika iz koksa, kao npr.:



Ovisno o brzini hlađenja, pri skrućivanju taljevine iz visoke peći i o masenom udjelu Si ili Mn, nastaje bijelo ili sivo sirovo željezo.

Bijelo sirovo željezo je osnovna sirovina za proizvodnju čelika, čeličnog i bijelog tvrdog lijeva, a sivo za dobivanje sivih ljevova. Od ukupne proizvodnje sirovog željeza oko 90 % se prerađuje u čelik, a ostalih 10 % u ljevove.

Danas su rašireni suvremeni postupci sekundarne metalurgije koji razdvajaju proizvodnju sirovog željeza od postupka pročišćavanja i toplog i hladnog oblikovanja. Sekundarna metalurgija omogućuje veliku fleksibilnost proizvodnje i postizanje ujednačene kvalitete i preciznog sastava.

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($\leq 2\%C$), uz prisutne pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostale) i uz eventualni dodatak jednog ili više legiranih elemenata.


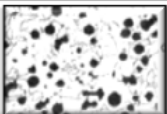
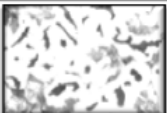

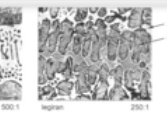
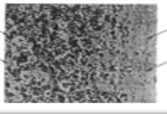

Čelici se nakon lijevanja u kalupe (kokile) oblikuju postupcima deformiranja (valjanjem, prešanjem, kovanjem i sl.) u željeni oblik poluproizvoda (limovi, trake, šipke, cijevi, profili i sl.).

Razlikujemo ugljične i legirane- nisko, srednje i visoko legirane čelike.

Čelik se dobiva od bijelog sirovog željeza, a može se dobiti i pretaljivanjem otpadnog ili starog čelika. Osim metalnog dijela za proizvodnju čelika potrebni su i pomoćni materijali za oksidaciju i dezoksidaciju čelika. U procesu pretaljivanja želi se izgaranjem smanjiti masene udjele C, P i S, a djelomice Si i Mn (prema sastavu čelika). Upuhivanjem zraka ili kisika u peć, dolazi do izgaranja ugljika u CO i CO₂, a ostali se elementi vežu u čvrste okside koji se većinom skupljaju u troski i s njom se odstranjuju. Ovaj se postupak naziva pročišćavanje ili rafinacija i provodi se u konverterima ili u drugim pećima različitog oblika i različitih izvora energije za pretaljivanje. Tijekom proizvodnje čelik dolazi u dodir s kisikom i dušikom, a pri višim temperaturama može otopiti znatne količine kisika, što uzrokuje opasnost od osjetljivosti na starenje i na tzv. "crveni lom". Otklanjanje kisika tijekom proizvodnje čelika naziva se dezoksidacija. Ovaj postupak zasniva se na dodavanju elemenata koji imaju veći afinitet prema kisiku od željeza i koji vežu kisik u okside.

Legirni elementi se dodaju u taljevinu, obično u obliku ferolegura (spojevi sa željezom, kao što je ferokrom, feronikal i dr.) neposredno prije ulijevanja u kalupe, odnosno prije skrućivanja. Proizvod pročišćavanja, dezoksidacije i legiranja je rastaljeni čelik odgovarajućeg sastava. Lijevanje se može provesti na konvencionalni način lijevanjem u kokile ili na suvremeni način

kontinuiranim lijevanjem (konti- lijev). Skrućeni čelik se reže na blokove, odnosno ingote određene duljine, za različite upotrebe u valjaonicama. Na slici 2. prikazani su proizvodi visoke peći te podjela sirovog željeza s obzirom na sastav, tj. mikrostrukturu.

SIROVO ŽELJEZO > 90 %Fe 2 – 4 %C Prateći elementi: Si, Mn, ... Nečistoće: P, S ...	SIVO (Ljevaoničko) 10 % Povišen Si (grafitizator) (2...3%) Snižen Mn (cementator) Stabilna kristalizacija! (C) → grafit	Lističasti grafit		Sivi lijev	Postolja i kućišta strojeva -prigušuje vibracije - podmazuje - OT	
		Kuglasti grafit		Nodularni lijev		
		Vermikularni (cvičasti) grafit		Vermikularni lijev		
	BIJELO (Čeličansko) 90 % Povišen Mn (cementator) Snižen Si < 2 % (grafitizator) Metastabilna kristalizacija! (C) → Fe ₃ C	Karbid (K): Fe ₃ C (Fe,Mn) ₃ C Cr ₇ C ₃			Bijeli tvrdi lijev	Dijelovi građ. strojeva za drobljenje, valjanje
		Decementacijsko žarenje	Oksidacijska atmosfera		Bijeli temper lijev	-ručni alat - cijevne spojnice - lanac
		Fe ₃ C → 3Fe + C	Neutralna atmosfera		Crni temper lijev	- bubnjevi - kočnica - vilice (mali-kompl. oblika)
		Proizvodnja čelika i čeličnih lijevova	Pročišćavanje	2-4 %C → 0,1-1,5 %+(Mn, Si)	Nečistoće: P, S, As, Sn	Plinovi: O, H, N
		Dezoksidacija	CaSi: Al → Cao, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ u trosku			
		Legiranje (ferolegure: Fe-Me)	Mn, Cr, Ni, Mo, W, V, Co,...			

Slika 2: Proizvodi visoke peći te podjela sirovog željeza s obzirom na sastav, tj. mikrostrukturu

2.1. Označavanje čelika prema hrvatskim i europskim normama

2.1.1. Označavanje čelika prema hrvatskoj normi HRN C.B0.002

Ovom normom propisan je sustav označavanja čelika i čeličnog lijeva, kao i pravila za označavanje stanja i svojstava čelika. Čelici se označavaju oznakom koja se sastoji iz najviše četiri dijela i to:

ČXXXX(X) .X(X...) -X(X...)

1. **Slovni simbol** - Č ili ČL kojim se označava materijal, čelik ili čelični lijev.
2. **Osnovna oznaka** - sastoji se iz četiri ili rjeđe pet broječnih simbola, kojima se označava vrsta čelika.
3. **Dopunska oznaka** - sastoji se iz jednog, dva ili više broječnih ili slovnih simbola i njihovih kombinacija, kojima se po potrebi označava namjenu, odnosno stanje čelika.
4. **Ostale dopunske oznake** - sastoje se iz jednog, dva ili više broječnih ili slovnih simbola i njihovih kombinacija, kojima se po potrebi označavaju druge karakteristike čelika.

2.1.2. Osnovna oznaka

Broječni simboli od kojih se sastoji osnovna oznaka označavaju skupine čelika:

- Čelici s nezajamčenim kemijskim sastavom,
- Čelici sa zajamčenim kemijskim sastavom (nelegirani – ugljični čelici i legirani čelici).

2.3.1.1 Osnovna oznaka za čelike s nezajamčenim kemijskim sastavom

- Simbol na prvom mjestu je "0" i označava pripadnost čelika ovoj skupini.
- Simbol na drugom mjestu označava nazivnu vlačnu čvrstoću koja je utvrđena za čelik u toplo oblikovanom ili normaliziranom stanju.

Značenje simbola na drugom mjestu :

Tablica 1.: Značenje simbola na drugom mjestu u oznaci čelika s nezajamčenim kemijskim sastavom

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
bez propisanih mehaničkih svojstava	do 320 MPa	od 330 do 350 MPa	od 360 do 380 MPa	od 390 do 480 MPa	od 490 do 580 MPa	od 590 do 680 MPa	od 690 do 780 MPa	od 790 do 880 MPa	od 890 MPa

- Simbol na trećem, četvrtom i petom mjestu označava redni broj čelika.

Značenje simbola na trećem, četvrtom i petom mjestu:

Od **00 do 44** – ugljični čelici s nezajamčenom čistoćom (P i S); Od 101 do 449 – slobodno,

Od **45 do 79** (451 do 799) - ugljični čelici s ograničenim sadržajem nečistoća. Za čelike iz ove podskupine djelomično se ograničava sadržaj osnovnih kemijskih elemenata (C, Si i Mn).

Od **80 do 99** (801 do 999) – podskupina čelika s ograničenim sadržajem nečistoća (P i S), djelomično utvrđenim sadržajem osnovnih elemenata (C, Si i Mn) i sa dodatkom legiranih elemenata koji se dodaju čeliku zbog postizanja posebnih mehaničkih svojstava.

- Na petom mjestu ne koristi se broj "0" (nula)
- Broj 7 na trećem mjestu označava **nesmireno**, a broj 6 **smireno** ili **posebno smireno** stanje.

Posebna oznaka na četvrtom mjestu (samo za neke čelike):

1 – zajamčena vrijednost udarne radnje loma pri +20 °C

2 – zajamčena vrijednost udarne radnje loma pri 0 °C – zajamčena vrijednost udarne radnje loma pri -20 °C

2.3.1.2 Osnovna oznaka za nelegirane čelike sa zajamčenim kemijskim sastavom

- Simbol na prvom mjestu je "1".
- Simbol na drugom mjestu označava **deseterostruku** vrijednost maksimalnog sadržaja **ugljika** u % zaokruženu na cijeli broj. Ako je % C $\geq 0,9$ % tada se piše "9".
- Simbol na trećem i četvrtom, odnosno trećem, četvrtom i petom mjestu predstavlja redni broj čelika prema namjeni i to:

- 00 - 19 (101 - 199) – čelici koji nisu namijenjeni toplinskoj obradbi;
- 20 - 29 (201 - 299) – čelici za cementiranje;
- 30 - 39 (301 - 399) – čelici za poboljšavanje;
- 40 - 59 (401 - 599) – čelici za alate;
- 90 - 99 – čelici poboljšane obradivosti (čelici za obradu na automatima).

2.3.1.3 Osnovna oznaka za legirane čelika sa zajamčenim kemijskim sastavom

- Simbol na prvom mjestu označava najutjecajniji legirni element.

Simboli i redni broj kemijskih elemenata, granice sadržaja iznad kojih se elementi smatraju legirnim i faktori utjecaja:

Tablica 2. Simboli i redni broj kemijskih elemenata u oznaci čelika sa zajamčenim kemijskim sastavom

element	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Al	ost.
% više od	-	0,6	0,8	0,3	0,3	0,1	0,08	0,01	0,1	0,05	0,4	0,1	0,05
redni broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	9	9	9
faktor utjecaja	-	1	1	4	4	7	14	17	20	30	1	1	30

- Simbol na drugom mjestu označava prema utjecajnosti drugi legirni element.

Kod jednostruko legiranih čelika na drugom mjestu je uvijek broj 1.

- Simbol na trećem i četvrtom, odnosno trećem, četvrtom i petom mjestu predstavlja redni broj čelika prema namjeni i to:

- 00 - 19 (101 - 199) – čelici koji nisu namijenjeni TO;
- 20 - 29 (201 - 299) – čelici za cementiranje;
- 30 - 39 (301 - 399) – čelici za poboljšavanje;
- 40 - 59 (401 - 599) – čelici za alate;
- 60 - 69 (601 - 699) – čelici posebnih fizikalnih svojstava;
- 70 - 79 (701 - 799) – kemijski postojani i vatrootporni čelici;
- 80 - 89 – brzorezni čelici; 801 - 899 – slobodno;
- 90 - 99 – čelici poboljšane obradivosti; 901 - 999 – slobodno.

2.3.1.4. Dopunska oznaka

Za dopunske oznake čelika koriste se jedan ili više brojeva ili slova, a u nekim slučajevima i kombinacija brojeva i slova ili obrnuto.

Osnovna se oznaka od dopunske oznake za namjenu, odnosno stanje čelika, razdvaja točkom. Dopunska oznaka se u pravilu unosi u tehnološku dokumentaciju i dokumentaciju za naručivanje čelika, a rijetko u konstrukcijske crteže.

Dopunske oznake za namjenu, odnosno stanje proizvoda od čelika:

0- bez određene toplinske obradbe;	5- vučeno – hladno deformirano;
1- žareno;	6- ljušteno;
2- žareno na najbolju obradivost;	7- brušeno;
2A- toplinski obrađeno na određenu vlačnu čvrstoću;	8- kontrolirano hladeno;
2B- toplinski obrađeno na feritno-perlitnu mikrostrukturu;	8A- gašeno;
2C- pogodno za rezanje u hladnom stanju;	8B- termomehanički obrađeno;
2D- žareno na globularni cementit;	9- obrađeno prema posebnim uputama;
3- normalizirano;	K- za toplo kovanje i prešanje;
4- poboljšano;	S- za hladno savijanje;
	V- za vučenje;
	Z- za izradu zavarenih cijevi.

2.3.2. Označavanje čelika prema europskoj normi EN 10027-1

Po normi EN 10027-1 označavanje čelika provodi se prema sljedećim kriterijima:

- označavanje prema namjeni te mehaničkim i fizikalnim svojstvima
- označavanje prema kemijskom sastavu.

Općenito, sve oznake čelika se sastoje od tri dijela:

Tablica 3. Oznaka čelika prema europskoj normi EN 100027-1

Glavne oznake	Dodatne oznake za čelik	Dodatne oznake za čelični proizvod
---------------	-------------------------	------------------------------------

Ako je čelik utvrđen kao čelični ljev, prije njegove glavne oznake stavlja se slovo G.

2.1.2.1. Glavne oznake

- Kod označavanja čelika prema njihovoj namjeni te mehaničkim i fizikalnim svojstvima, glavne oznake definirane su kroz 11 skupina čelika:
 - S- Konstrukcijski čelici
 - P- Čelici za tlačne namjene
 - L- Čelici za cjevovode
 - E- Čelici za strojogradnju
 - B- Čelici za armiranje betona
 - Y- Čelici za prednapinjanje betona
 - R- Čelici za tračnice ili u obliku tračnica
 - H- Hladno valjani plosnati proizvodi od čelika povišene čvrstoće za hladno oblikovanje
 - D- Plosnati proizvodi za hladno oblikovanje (osim onih pod H)
 - T- Limovi i trake za pakiranje
 - M- Elektrolim i elektrotraka

- Kod označavanja čelika prema njihovu kemijskom sastavu, glavne oznake definirane su kroz 4 skupine čelika:

1. **Nelegirani čelici** sa srednjim sadržajem **Mn < 1%** (osim čelika za obradu na automatima)
2. **Nelegirani čelici** sa srednjim sadržajem **Mn ≥ 1%**, nelegirani čelici za obradu na automatima i legirani čelici (osim brzoreznih čelika) kod kojih je srednji sadržaj pojedinog legirnog elementa < 5%
3. **Legirani čelici** (osim brzoreznih) kod kojih je srednji sadržaj najmanje jednog legirnog elementa ≥ 5%
4. **Brzorezni čelici**

2.1.2.2. Dodatne oznake za čelik

Kod oba kriterija označavanja dodatne oznake za čelik podijeljene su u dvije grupe: **grupu 1** i **grupu 2**. Oznake iz grupe 2 mogu se upotrebljavati jedino povezano s oznakama iz grupe 1 i dolaze iza njih.

2.1.2.3. Dodatne oznake za čelični proizvod

Kod oba kriterija označavanja, dodatne oznake za čelični proizvod slijede iza oznaka grupe 1 i grupe 2 i moraju biti odvojene od prethodnih oznaka znakom plus (+).

Dodatne oznake za čelični proizvod, ovisno o skupini čelika, izabiru se iz sljedećih tablica:

Tablica 4. Dodatne oznake za čelični proizvod, ovisno o skupini čelika

Oznaka	Značenje
+H	kaljivost
+Z15	najmanje suženje u smjeru okomitom na površinu 15%
+Z25	najmanje suženje u smjeru okomitom na površinu 25%
+Z35	najmanje suženje u smjeru okomitom na površinu 35%
NAPOMENA: Te oznake čelika načelno označuju posebne zahtjeve. Iz praktičnih razloga služe također kao dodatne oznake čeličnih proizvoda	

G = čelični lijev (gdje je potrebno) P = čelici za tlačne namjene	nnn = min. granica razvlačenja (R_e), MPa za područje najmanjih debljina	termomehanički valjano normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano poboljšano plinske boce jednostavne tlačne posude cijevi druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojke NAPOMENA: Oznake M, N i Q važe za sitnozrnate čelike	visoka temperatura niska temperatura sobna temperatura visoka i niska temperatura	Tablice 1, 2, 3 Primjer: GP280GH
L = čelici za cjevovode	nnn = min. granica razvlačenja (R_e), MPa za područje najmanjih debljina	M = termomehanički valjano N = normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano Q = poboljšano G = druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojke NAPOMENA: Oznake M, N i Q važe za sitnozrnate čelike	a = razred zahtjeva, prema potrebi slijedi jednoznamenasti broj	Tablice 1, 2, 3 Primjer: L360QB
E = čelici za strojogradnju (bez utvrđenih zahtjeva za žilavost ili zavarljivost.)	nnn = min. granica razvlačenja (R_e), MPa za područje najmanjih debljina	G = druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojke	C = prikladno za hladno vučenje	Tablica 3 Primjer: E355
B = čelici za armiranje betona	nnn = min. granica razvlačenja (R_e), MPa za područje najmanjih debljina	a = razred duktilnosti, ako je potrebno s 1 ili 2 brojke		Tablica 3 Primjer: B500A
Y = čelici za prednapinjanje betona	nnnn = min. vlačna čvrstoća ^{*)} (R_m), MPa ^{*)} Ako je R_m troznamenasti broj, ispred se stavlja nula	C = hladno vučena žica H = toplo oblikovane ili toplo obrađene šipke Q = poboljšana žica S = užad G = druge značajke, ako je potrebno s 1 ili 2 brojke		Tablica 3 Primjer: Y1770C
R = čelici za tračnice ili u obliku tračnica	Nnnn = min. vlačna čvrstoća ^{*)} (R_m), MPa ^{*)} Ako je R_m troznamenasti broj, ispred se stavlja nula	Mn = visoki sadržaj mangana Cr = legirano kromom an = znakovi propisanih dodatnih kemijskih elemenata (npr. Cu, ako je potrebno zajedno s jednoznamenastim brojem koji je 10 × srednja vrijednost (zaokružena na 0,1 %) propisanog područja sadržaja tog elementa). G = druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojke	Q = poboljšano	Primjer: R0900Mn
H = hladno valjani plosnati proizvodi od čelika povišene čvrstoće za hladno oblikovanje	nnn = min. granica razvlačenja (R_e), MPa T_{nnn} = min. vlačna čvrstoća (R_m), MPa	M = termomehanički valjano i hladno valjano B = površinski otvrdnuto P = legirano fosforom X = dvofazno Y = intersticijski slobodan (IF-čelik) G = druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojke	D = za prevlake uranjanjem	Tablica 2 Primjer: H400M
D = plosnati proizvodi za hladno oblikovanje	C_{nn} = hladno valjano, slijedi dvoznamenkasti broj; D_{nn} = toplo valjano za neposredno hladno oblikovanje, slijedi dvoznamenkasti broj; X_{nn} = vrsta valjanja nije propisana, slijedi dvoznamenkasti broj.	D = za prevlačenje vrućim uranjanjem EK = za konvencionalno emajliranje ED = za izravno emajliranje H = za šuplje profile T = za cijevi an = znakovi propisanih dodatnih kemijskih elemenata (npr. Cu, ako je potrebno, zajedno s jednoznamenastim brojem koji je 10 × srednja vrijednost (zaokružena na 0,1 %) propisanog područja sadržaja tog elementa). G = druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojke		Tablica 2, 3 Primjer: DC04EKM
T = limovi i trake za pakiranje	H_{nn} = propisana vrijednost tvrdoće (Rocwell HR 30 T_m) za jednostruko stanjene proizvode nnn = nazivna granica razvlačenja (R_e) MPa za dvostruko stanjene proizvode			Tablice 2, 3 ^{*)} ^{*)} Za crni lim nisu predviđene oznake. Primjer: T660
Glavne oznake				
M = elektrolim i elektrotraka	nnnn = najveći dopušteni gubitak pri demagnetizaciji u W/kg × 100 nn = 100 × nazivna debljina u mm Obje oznake se razdvajaju crticom.	Za magnetsku indukciju od 1,5 Tesla pri 50 Hz: A = neusmjereno zrno B = nelegirano (bez završnog žarenja) E = legirano (bez završnog žarenja) N = usmjereno zrno s normalnim gubicima pri demagnetizaciji Za magnetsku indukciju od 1,7 Tesla pri 50 Hz: S = usmjereno zrno s ograničenim gubicima pri demagnetizaciji P = usmjereno zrno s niskim gubicima pri demagnetizaciji		Primjer: 400-50A

Tablica 8. Označavanje čelika prema kemijskom sastavu

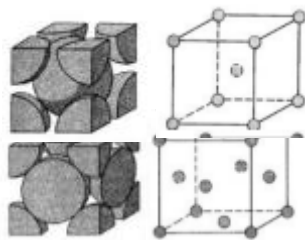
Glavne oznake		Dodatne oznake		za čelični proizvod										
slovo	mehaničko svojstvo	za čelik												
		grupa 1	grupa 2											
G = čelični ljev (ako je potrebno) C = ugljik (Nelegirani čelici)	nnn = 100 × sredina propisanog područja sadržaja ugljika. Ako nije zadano područje sadržaja ugljika, treba izabrati prikladnu reprezentativnu vrijednost. -Radi razlikovanja dviju vrsta čelika sličnog kemijskog sastava, može se brojčana oznaka sadržaja ugljika povećati za 1	E = propisani najveći sadržaj sumpora R = propisano područje sadržaja sumpora D = za vučenje žice C = za hladno oblikovanje, npr. hladno gnječenje, hladno istiskivanje S = za opruge U = za alate W = za žicu za zavarivanje G = druge značajke, prema potrebi slijedi jedna ili dvije brojke ¹⁾ Oznake grupe 1, osim E i R, mogu biti upotpunjene s jednom ili dvije brojke u svrhu razlikovanja vrste čelika prema pripadajućoj normi za proizvod. ²⁾ Oznake E i R grupe 1 mogu biti upotpunjene s jednom brojkom koja predstavlja 100 × dopušteni ili srednji sadržaj sumpora, prethodno zaokružen na 0,01 %.	an = znakovi propisanih dodatnih kemijskih elemenata, npr. Cu iza kojega, prema potrebi, slijedi jednoznačenasti broj dobiven množenjem srednje vrijednosti propisanog područja sadržaja s 10 (zaokruženo na 0,1)	Tablica 3 Primjer: C35E										
Glavne oznake			Dodatne oznake											
			za čelik	za čelični proizvod										
G = čelični ljev (ako je potrebno) (Nisko-legirani čelici)	nnn = 100 × sredina propisanog područja sadržaja ugljika. Ako nije zadano područje sadržaja ugljika, treba izabrati prikladnu reprezentativnu vrijednost. -Radi razlikovanja dviju vrsta čelika sličnog kemijskog sastava, može se brojčana oznaka sadržaja ugljika povećati za 1	a = kemijski znakovi karakterističnih legiranih elemenata, slijedi: n-n = brojke odvojene crticom, dobivene množenjem srednje vrijednosti sadržaja elementa sa sljedećim faktorom <table border="0"> <tr> <td>Element</td> <td>Faktor</td> </tr> <tr> <td>Cr, Co, Mn, Ni, Si, W</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Ce, N, P, S</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1000</td> </tr> </table>	Element	Faktor	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10	Ce, N, P, S	100	B	1000		Tablice 1, 3 Primjer: 28Mn6
Element	Faktor													
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4													
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10													
Ce, N, P, S	100													
B	1000													
G = čelični ljev (ako je potrebno) X = srednji sadržaj najmanje jednog legirnog elementa ≥ 5% (Visok-legirani čelici)	nnn = 100 × sredina propisanog područja sadržaja ugljika. Ako nije zadano područje sadržaja ugljika, treba izabrati prikladnu reprezentativnu vrijednost. -Radi razlikovanja dviju vrsta čelika sličnog kemijskog sastava, može se brojčana oznaka sadržaja ugljika povećati za 1	a = kemijski znakovi karakterističnih legiranih elemenata čelika nakon kojih slijedi n-n = brojke odvojene crticom, odgovarajuće srednjim vrijednostima sadržaja elemenata, zaokruženo na slijedeći cijeli broj Primjer: X5CrNi18-10		Tablice 1, 3										
HS = brzorezni čelik	n-n = brojke odvojene crticom predstavljaju pripadajući postotni sadržaj pojedinog legirnog elementa zaokruženog na cijeli broj u sljedećem redoslijedu: ➤ volfram (W) ➤ molibden (Mo) ➤ vanadij (V) ➤ kobalt (Co)			Tablica 3 Primjer: HS6-5-2										

3. Fe-C dijagram stanja za metastabilnu kristalizaciju

Općenito o kemijskom elementu Fe:

- Fe dolazi od latinskog naziva za željezo Ferrum,
- do danas nije proizvedeno apsolutno čisto željezo (C, Si, Mn, P, S),
- srebrnaste boje,
- ne dolazi u prirodi samorodno (važne su oksidne rude),
- u vlažnom zraku korodira i stvara se hrđa ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)
- željezni III hidroksid
- talište $\approx 1536 \text{ }^\circ\text{C}$
- gustoća $7,87 \text{ g/cm}^3$
- tvrdoća 60 HB
- vlačna čvrstoća od 200 do 210 N/mm^2
- granica razvlačenja od 100 do 120 N/mm^2
- istežanje $\approx 50 \%$,
- kontrakcija $\approx 80 \%$
- udarna radnja loma $\approx 250 \text{ J}$.

Željezo je polimorfan materijal i ima dvije alotropske modifikacije:



BCC - prostorno centrirana kubična rešetka (engl. body centred cube).

FCC - plošno centrirana kubična rešetka, (engl. face centred cube). Raspored atoma u rešetki ovisi o temperaturi pri kojoj se željezo nalazi

Slika 3. Prikaz prostorno i plošno centrirane kubne rešetke željeza

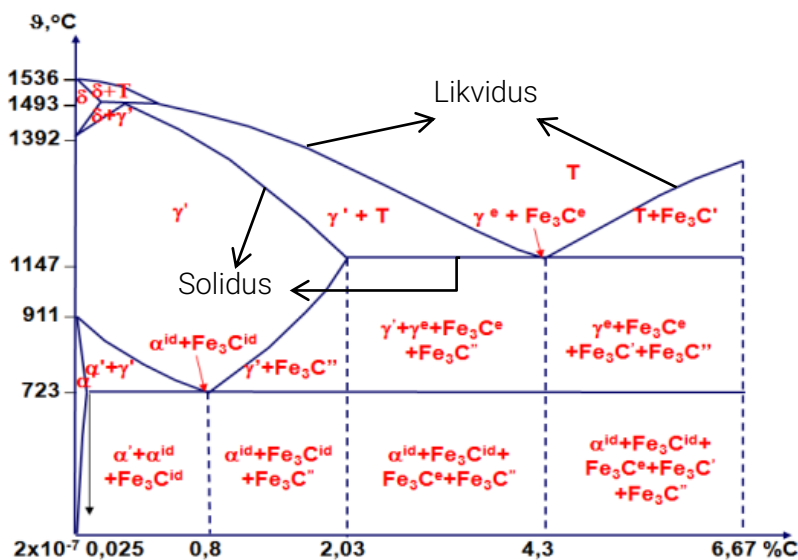
3.1.1. Pojavni oblici C u legurama Fe- C

Budući da čisto željezo nije šire primjenjivo u industriji, zbog svojih niskih vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja, treba ga legirati s drugim elementima, ponajprije ugljikom. Ugljik je najvažniji dodatak željezu, jer:

- vrlo jako utječe na čvrstoću, tvrdoću i granicu razvlačenja željeznih legura,
- omogućava kaljenje čeličnih legura.

Ugljik je u BCC željezu praktično netopiv, a u FCC željezu je samo ograničeno topiv (najviše 2,03%C pri 1147 °C) Ako se neka legura Fe- C ohlađuje beskrajno sporo iz rastaljenog stanja, C će se izlučiti u obliku grafita $K_C^G = 100\%$. Ovaj se oblik skrućivanja naziva stabilnim, a ravnotežni se dijagram stanja naziva dijagramom Fe- C za stabilnu kristalizaciju. Ako se neka legura Fe- C ohlađuje umjereno sporo iz rastaljenog stanja, C će se spojiti s Fe u željezni karbid (cementit) Fe_3C ($K_C^{Fe_3C} = 6,687\%$). Ovaj se oblik skrućivanja naziva metastabilnim, a ravnotežni se dijagram stanja naziva dijagramom Fe- C za metastabilnu kristalizaciju (ili dijagramom Fe- Fe_3C).

3.1.2. Fe- C dijagram stanja za metastabilnu kristalizaciju



Strukturne faze:

- Taljevina - T
- Austenit:
 - γ' (primarni austenit)
 - γ^e (eutektički austenit)
- Ferit:
 - α' (primarni ferit)
 - α^{id} (eutektoidni ferit)
 - δ (delta ferit)
- Karbid:
 - Fe_3C' (primarni karbid)
 - Fe_3C'' (sekundarni karbid)
 - Fe_3C^{id} (eutektoidni karbid)
 - Fe_3C^e (eutektički karbid)
- Ledeburit: $\gamma^e + Fe_3C^e$
- Perlit: $\alpha^{id} + Fe_3C^{id}$

Slika 4. Fazni Fe- Fe_3C dijagram za metastabilnu ravnotežnu kristalizaciju

Linija koja razdvaja talinu od prvih tragova krutnine naziva se **likvidus linija**.

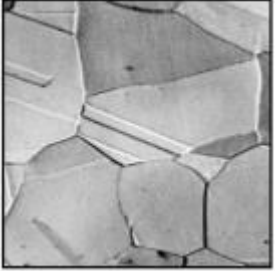
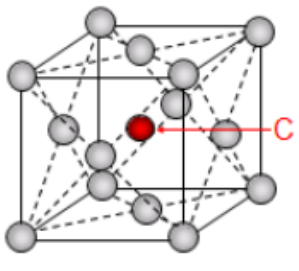
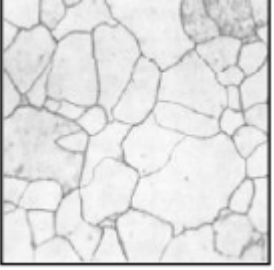
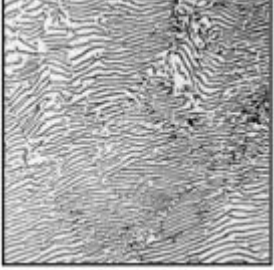
- Linija koja razdvaja krutninu od prvih tragova taline naziva se **solidus linija**.



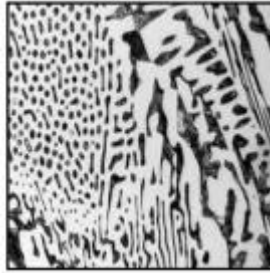
- Kristalizacija koja se odvija između likvidus i solidus linije naziva se **primarna kristalizacija** (talina prelazi u krutninu).
- Kristalizacija koja se odvija ispod solidus linije naziva se **sekundarna kristalizacija** (alotropске modifikacije krutnine).
- **Eutektička reakcija** nastupa pri 1147 °C kada je u taljevini koncentracija ugljika 4,3 %C.
- **Eutektoidna reakcija** nastupa pri 723°C kada je u austenitu γ' koncentracija ugljika 0,8 %C.

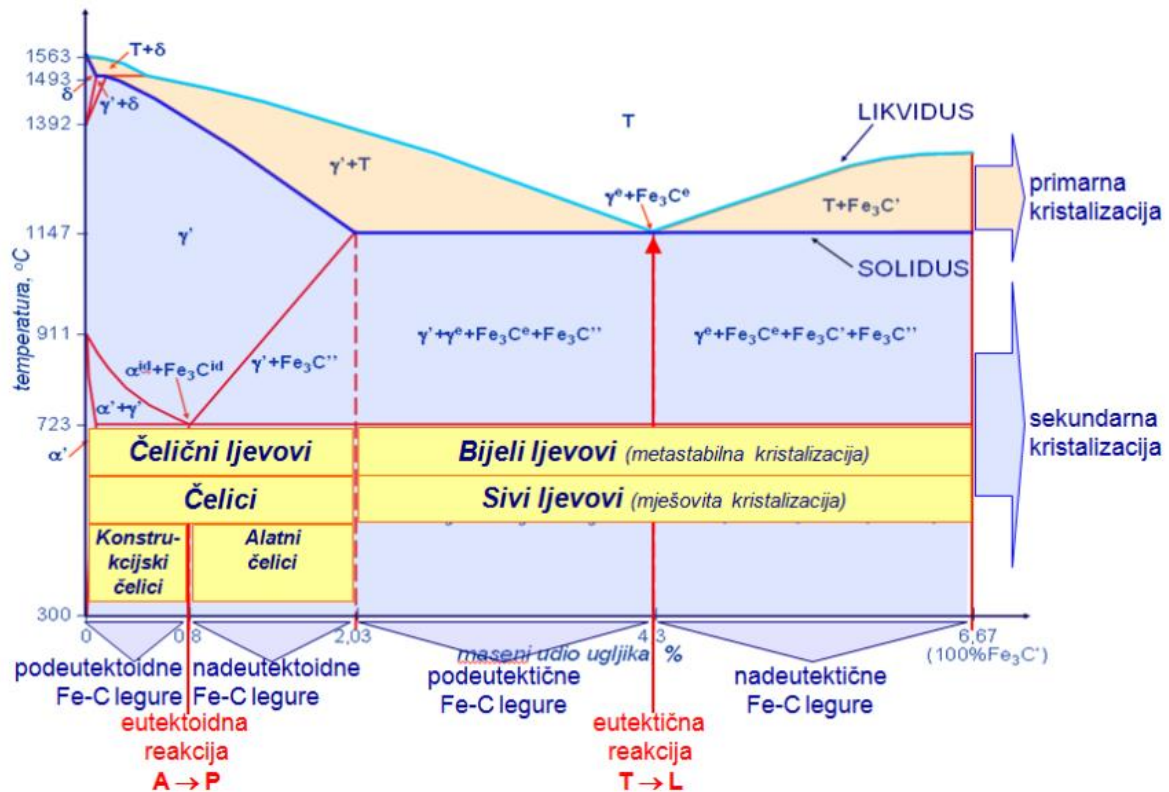
- Legure koje sadrže manje od 0,8 %C su **podeutektoidne legure**.
- Legure koje sadrže manje od 2,03 %C, a više od 0,8 %C su **nadeutektoidne legure**.
- Legure koje sadrže manje od 4,3 %C, a više od 2,03 %C su **podeutektičke legure**.
- Legure koje sadrže više od 4,3 %C su **nadeutektičke legure**.
- Metastabilno kristalizirane legure željeza i ugljika s više od 0 %C do 2,03 %C su **čelici**.
- Podeutektoidni čelici su uglavnom konstrukcijski, a eutektoidni i nadeutektoidni uglavnom alatni čelici.
- Metastabilno kristalizirane legure željeza i ugljika od 2,03 do 6,67 %C su **bijeli ili sivi ljevovi**.

U tablici 9. prikazane su mikrostrukturne faze koje se pojavljuju u Fe- Fe₃C dijagramu, a na slici 5. područja Fe-C legura u Fe₃C dijagramu.

Tablica 9. Prikaz mikrostrukturnih faza koje se pojavljuju u Fe- Fe₃C dijagramu

	<p>Austenit je intersticijski kristal mješanac ugljika i γ željeza u FCC rešetci. Kod metastabilne kristalizacije maksimalna topljivost ugljika u austenitu iznosi 2,03 %C, na 1147 °C, a na 723 °C topljivost pada na 0,8 %C.</p>	
	<p>Ferit je intersticijski kristal mješanac ugljika i α željeza u BCC rešetci. Maksimalna topljivost ugljika u feritu je 0,025 %C na 723 °C, a na 20 °C pada na 2×10^{-7} %C što je praktički jednako nuli.</p>	
	<p>Perlit je eutektoid metastabilno kristaliziranih legura Fe – C. Ima 0,8 %C, a sastoji se od eutektoidnog ferita (α^{id}) i eutektoidnog cementita (Fe_3C^{id}). Nastaje sekundarnom kristalizacijom od austenita na eutektoidnoj temperaturi 723 °C. U perlitu su lamele α^{id} (bijele) i Fe_3C^{id} (crne) naizmjenično poredane. Veći udio pripada α^{id} (oko 88 % mase), a manji udio Fe_3C^{id} (oko 12 % mase). Perlit je pseudofaza.</p>	

	<p>Struktura podeutektoidnih čelika je kombinacija feritnih (bijela polja) i perlitnih (tamna polja) zrna</p>
	<p>Struktura nadeutektoidnih čelika je perlitna (tamno polje) s izlučenim sekundarnim cementitom po granicama zrna. Sekundarni cementit ($\text{Fe}_3\text{C}''$) nastaje jer se snižavanjem temperature od $1147\text{ }^\circ\text{C}$ na $723\text{ }^\circ\text{C}$ snižava topljivost ugljika u austenitu s maksimalne topivosti od $2,03\text{ }\% \text{C}$ na $0,8\text{ }\% \text{C}$.</p>
	<p>Ledeburit je eutektikum metastabilno kristaliziranih legura Fe- C. Ima $4,3\% \text{C}$, a sastoji se od eutektičkog austenita (γ^e) i eutektičkog cementita (Fe_3C^e). Nastaje primarnom kristalizacijom taljevine na eutektičkoj temperaturi $1147\text{ }^\circ\text{C}$. Raspad ledeburita počinje čim se temperatura spusti ispod $1147\text{ }^\circ\text{C}$ i na sobnoj temperaturi ledeburit se raspada na perlit ($\alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$ - tamno polje) i karbide ($\text{Fe}_3\text{C}^e + \text{Fe}_3\text{C}''$). Ledeburit je pseudofaza.</p>

Slika 5. Prikaz faznog Fe- Fe₃C dijagrama s područjima Fe-C legura

3.1.3. Utjecaj legirnih elemenata na Fe-C dijagram

3.1.3.1. Svrha legiranja čelika

Ugljični čelici imaju niz svojstava koja bi trebalo poboljšati:

- eksploatacijska: granica tečenja (Re), udarna radnja loma, dinamička izdržljivost (Rd), otpornost na trošenje, kemijska postojanost...
- proizvodna: obradivost odvajanjem čestica, zavarljivost, kovnost, kaljivost...

Ugljični čelici su kaljivi samo gašenjem u vodi, što za sobom povlači opasnost od puknuća ili prevelikih deformacija pri kaljenju. Zbog navedenih razloga, proizvode se i legirani čelici koji, osim željeza i ugljika, sadrže i izvjesne udjele nekih legirnih elemenata, npr. : Si, Mn, Cr, Ni, W, Mo, V, Co, Ti, Cu, Al itd.

Prema ukupnom udjelu legirnih elemenata čelici se dijele na:

- ugljične čelike (nelegirane) $\sum Le \approx 0 \%$
- niskolegirane čelike $\sum Le \leq 5 \%$
- visokolegirane čelike $\sum Le > 5 \%$

S tehničke strane posebno je važno kako legirni elementi djeluju na promjenu Fe-Fe₃C dijagrama te u kakvom se obliku pojavljuju u Fe-C-Me leguri.

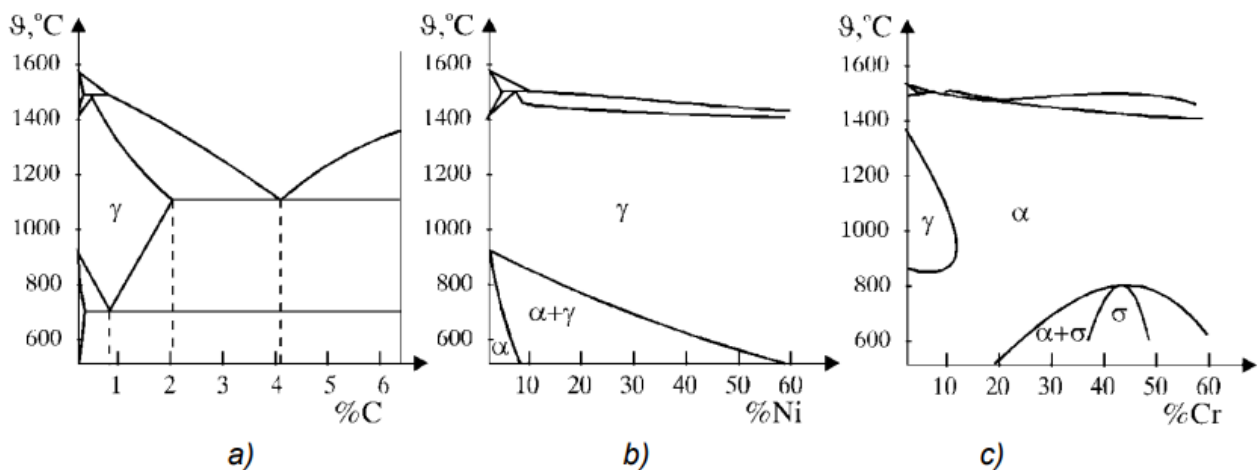
3.1.4. Utjecaj legirnih elemenata na oblik dijagrama stanja Fe-C

Legirani elementi u legurama željeza, ovisno o afinitetu prema ugljiku, dijele se na:

- karbidotvorce: Cr, W, Mo, V, Ti, Nb i Ta, koji se dijelom spajaju u karbide (npr. Cr_7C_3 , WC, Mo_2C , VC, TiC, TaC, NbC), a dijelom supstituiraju u željeznu rešetku,
- nekarbidotvorce: Ni, Mn i Co koji se supstituiraju u željeznu rešetku.

Elementi koji proširuju područje austenita u dijagramu Fe-Le u usporedbi s dijagramom Fe-C nazivaju se **gamageni elementi** (npr. Mn, Ni, Co, Cu). Porastom udjela gamagenog legirnog elementa snižavaju se temperature A_3 i A_1 , i proširuje se austenitno područje.

Elementi koji proširuju područje ferita u dijagramu Fe- Le, u usporedbi s dijagramom FeC, nazivaju se **alfageni elementi** (npr. Si, Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, Zr i B). Porastom udjela alfagenih legirnih elemenata povisuju se temperature A_1 i A_3 , i sužava se austenitno područje. Na slici 6. prikazani su utjecaji legirajućih elemenata na promjenu Fe- C dijagrama.

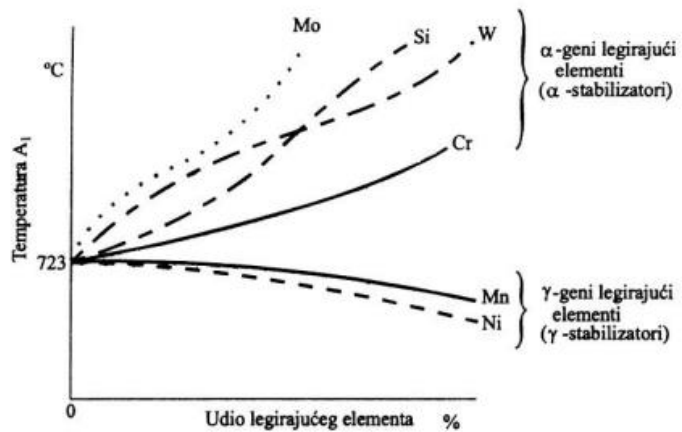


Slika 6. Sustavi Fe-Le: a) sustav Fe-C (metastabilni, za usporedbu) b) sustav Fe-Ni (prošireno γ područje) c) sustav Fe-Cr (prošireno α područje)

Legirni elementi mijenjaju granice pretvorbi i karakteristične sastave, pa zato i izobličavaju dijagram stanja Fe-C, što je prikazano na slikama 7. i 8.

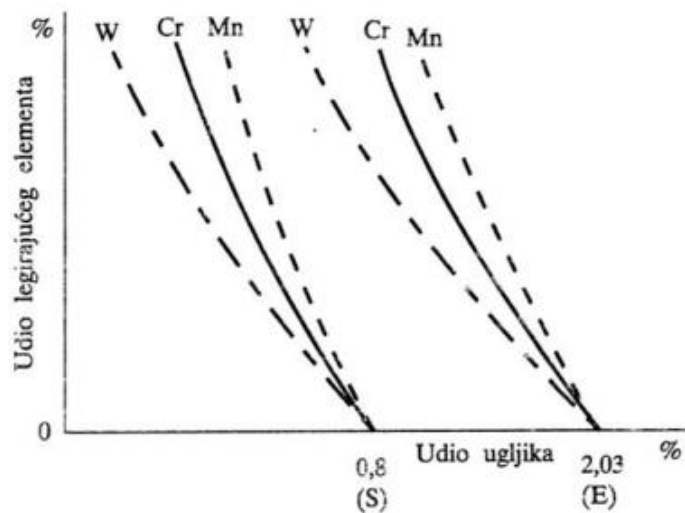
Alfageni legirni elementi povisuju temperaturu pretvorbe A_1 (a također i A_3 i A_{cm}), pa temperature austenitizacije čelika legiranih nekim od Le moraju biti više nego ugljičnih čelika jednakih sadržaja ugljika.

Gamageni legirni elementi snizuju temperaturu pretvorbe A_1 čelika legiranih tim elementima, pa su temperature austenitizacije niže nego one ugljičnih čelika jednakih sadržaja ugljika.



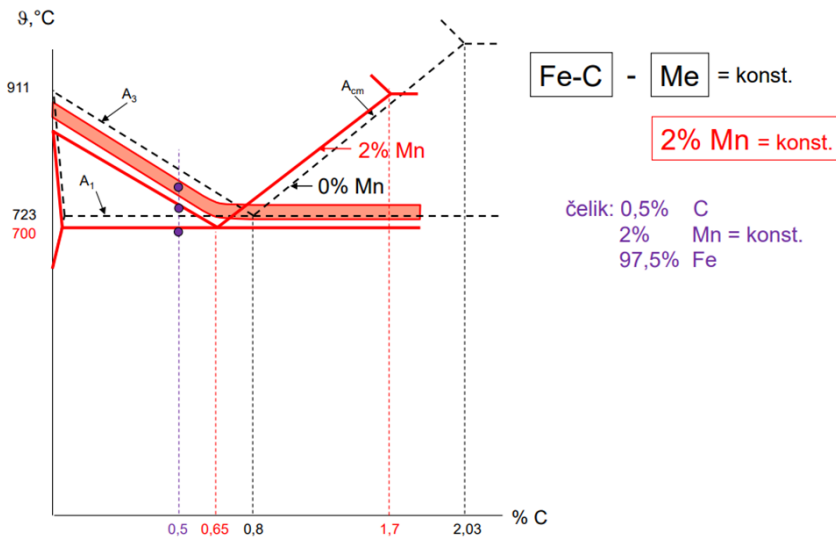
Slika 7. Utjecaj legirnih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit (A_1)

Svi legirni elementi snizuju i eutektoidnu koncentraciju ugljika ("perlitna" točka S) kao i maksimalnu topivost ugljika u austenitu (točka E).



Slika 8. Utjecaj legirnih elemenata na eutektoidnu koncentraciju ugljika (točka S) i maksimalnu topivost ugljika u austenitu (točka E)

Na slici 9. prikazan je jedan pseudobinarni dijagram legiranog čelika na kojemu vidimo utjecaj legirajućih elemenata na transformaciju.



Slika 9. Pseudobinarni dijagram čelika legiranog s 2 %Mn

4. Osnovni pojmovi toplinske obrade metala

4.1. Dijagram postupka toplinske obrade

Opća definicija: Toplinska obrada je postupak (ili kombinacija postupaka) kojim se obradak namjerno podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima, kako bi se postigla željena mikrostruktura, a time i željena svojstva (mehanička, fizička, kemijska).

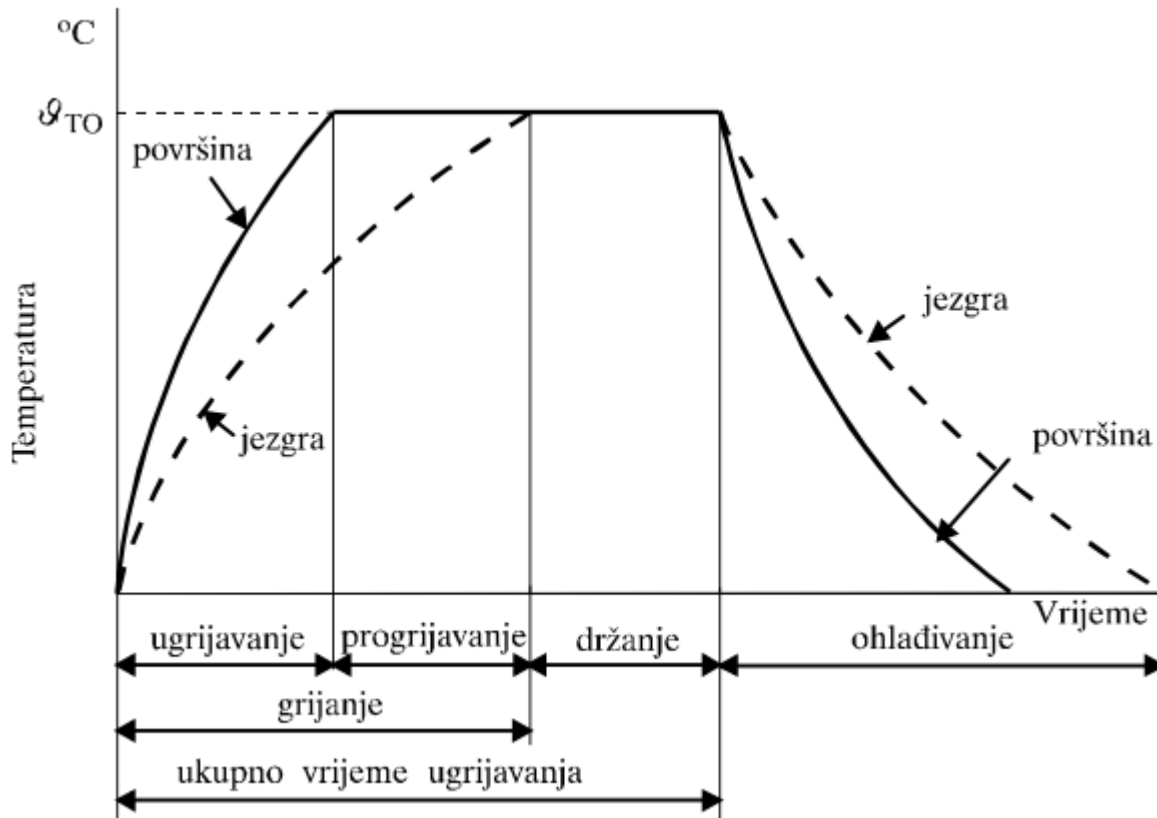
Osnovni parametri toplinske obrade su:

- temperatura, T (K), θ ($^{\circ}\text{C}$)
- trajanje (vrijeme), t (s, min, h).

Izvedeni parametar toplinske obrade:

- brzina ugrijavanja odnosno ohlađivanja, $v = dT/dt$ ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $^{\circ}\text{C}/\text{h}$)

Pomoću osnovnih parametara toplinske obrade i izvedenog parametra može se grafički prikazati svaki postupak toplinske obrade u tzv. dijagramu postupka (θ - t dijagramu), slika 10.



Slika 10. Opći dijagram postupka toplinske obrade

Iz dijagrama se vidi da se svaki postupak toplinske obrade općenito dijeli na tri faze:

- grijanje
- držanje
- ohlađivanje.

4.1.1. Grijanje

Grijanje je potrebno vrijeme da cijeli volumen obratka postigne temperaturu toplinske obrade (Θ_{T0}). Trajanje grijanja kojim površina obratka postiže temperaturu Θ_{T0} naziva se ugrijavanje. Odsječak vremena od trenutka ugrijavanja površine obratka na Θ_{T0} do časa kada i jezgra obratka postigne Θ_{T0} naziva se progrijavanje. Temperaturna razlika između površine i jezgre je veća ako je veća brzina ugrijavanja, veći volumen (masa) grijanog obratka, niži koeficijent toplinske vodljivosti, viši koeficijent prijelaza topline itd. Temperaturne razlike između jezgre i površine obratka znatno utječu na vlastita naprezanja. Kako bi se spriječio negativan utjecaj ugrijavanja na vlastita naprezanja obratka, ugrijavanje je ponekad potrebno provesti uz jedno ili više predgrijavanja.

4.1.2. Držanje

Držanje je faza toplinske obrade od časa kada je obradak progrijan (cijeli volumen ugrijan na ϑ_{T0}) do početka ohlađivanja. To je vrijeme potrebno za homogenizaciju strukture. Trajanje držanja ovisi o vrsti toplinske obrade, sastavu legure, temperaturi peći, sklonosti legure prema pogrubljenju zrna itd.

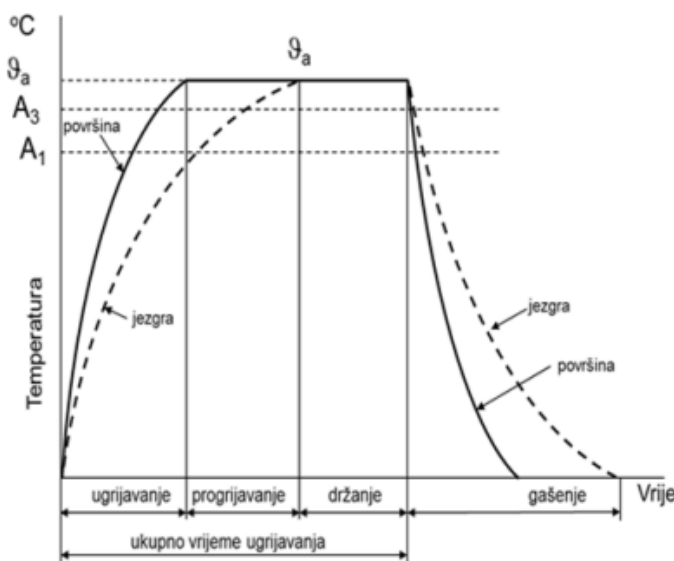
4.1.3. Ohlađivanje

Ohlađivanje je trajanje snižavanja temperature obratka sve dok jezgra ne dostigne zadanu temperaturu ohlađivanja, odnosno dok se temperatura jezgre ne izjednači s temperaturom površine i okoliša, odnosno sredstva za hlađenje. Trajanje ohlađivanja ovisi o izabranom sredstvu za hlađenje, a taj izbor ovisi o vrsti legure (sastavu) i o željenoj mikrostrukturi.

4.2. Postupci toplinske obrade metala

4.2.1. Kaljenje čelika

KALJENJE je postupak toplinske obrade koji se sastoji od naglog ohlađivanja (gašenja) austenitiziranog čelika. Na slici 11. prikazan je dijagram postupka kaljenja čelika s kontinuiranim gašenjem.



Slika 11. Dijagram postupka kaljenja čelika (s kontinuiranim gašenjem)

Svrha kaljenja:

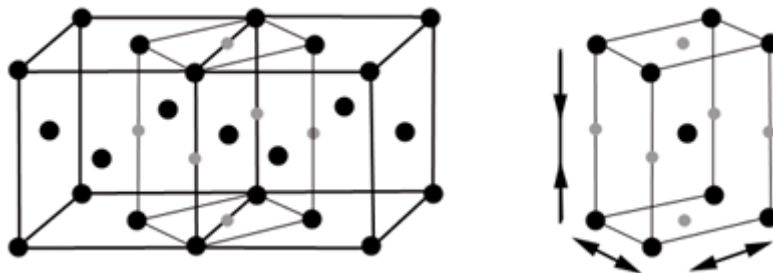
- Postizanje maksimalno moguće tvrdoće (ovisno o % ugljika u čeliku)
- Postizanje jednolične tvrdoće po poprečnom presjeku obratka (jednolično prokaljenje).
- Postupak kaljenja:
- ugrijavanje na temperaturu austenitizacije (ϑ_a) i progrijavanja
- držanje pri ϑ_a (s ciljem otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu)
- gašenje (radi postizanja martenzitne strukture).

Austenit je jedina faza iz koje u čeliku može nastati **martenzit**, te stoga veličina austenitnog zrna, te udio i raspored ugljika otopljenog u austenitu, značajno određuju veličinu zrna i mehanička svojstva martenzita (tvrdoću, čvrstoću, žilavost). Treba napomenuti da je austenitizacija difuzijski proces koji se događa iznad A_1 temperature.

Iz navedenih činjenica mogu se postaviti osnovni uvjeti zakaljivosti čelika:

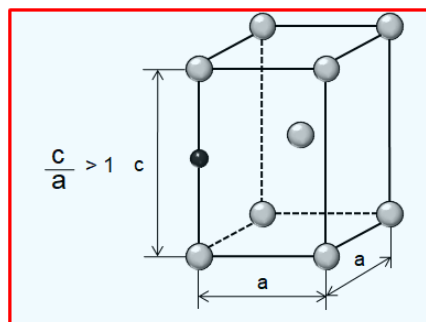
1. Postojanje mikrostrukturne pretvorbe ferita (F) u austenit (A) i obrnuto, (čelici bez ove pretvorbe ne mogu se kaliti, npr. visokolegirani feritni ili austenitni nehrđajući čelici)
2. Čelik mora sadržavati (dogovorno) najmanje 0,35 % C da bi dovoljan broj kristalnih rešetki γ željeza otopio atom ugljika
3. Čelik treba ugrijati u austenitno područje dijagrama stanja (monofazno ili dvofazno), tj. na optimalnu temperatura austenitizacije
4. Austenitizirani čelik treba dovoljno intenzivno hladiti, $v_{oh} \geq v_{kg}$, kako bi se spriječila difuzija ugljikovih atoma iz austenitne rešetke i ostvarilo prisilno zadržavanje atoma ugljika u novonastaloj kristalnoj rešetci martenzita.

Nastanak martenzitne rešetke iz austenita definirao je istraživač Edgar Bain, što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Bainovo tumačenje distorzija fcc-bcc-bct rešetke

Martenzit, koji nastaje kaljenjem, ima visoku čvrstoću i tvrdoću, ali nisku žilavost te visoke napetosti u mikrostrukтури. Rešetku karakterizira stupanj tetragonalnosti koji je veći od 1 a predstavlja odnos parametra rešetke c prema parametru a , što je prikazano na slici 13.



Slika 13. Stupanj tetragonalnosti martenzitne bct rešetke

Za praktičnu provedbu toplinske obrade ugljičnih čelika koriste se podatci iz Fe-Fe₃C i Uptonova dijagrama, slika 14., pri čemu treba imati na umu sljedeće:

- Fe-Fe₃C dijagram daje podatke potrebne za ugrijavanje (temperature austenitizacije), i to za slučaj sporijeg ugrijavanja. Za tehničku praksu podatci su dovoljno točni i za ohlađivanje, ali samo do onih brzina hlađenja koje se ostvaruju sporim hlađenjem u peći
- Uptonov dijagram daje podatke potrebne za gašenje (M_s i M_f) i vrijedi samo za slučaj vrlo brzog hlađenja (za slučaj ugljičnih čelika samo u slučaju gašenja u vodi).

Krivulja koja spaja temperature početka γ/α transformacije u slučaju vrlo brzog hlađenja ("gašenja") različitih Fe-C legura (ugljičnih čelika) označena je oznakom " M_s " ("Martensite Start"), tj. kao početak stvaranja martenzita (novi strukturni oblik, nepoznat iz metastabilnog Fe-Fe₃C dijagrama; M-faza). Dakle, dovoljno povišenje brzine ohlađivanja austenita potisnulo je krivulje A_3 , A_1 i A_{cm} metastabilnog Fe-Fe₃C dijagrama u jednu jedinstvenu krivulju M_s .

Prema tome, ako se čelik austenitne mikrostrukture dovoljno brzo ohlađuje, austenit će ostati postojan sve do pripadnog presjecišta Fe-C legure (čelika) s krivuljom M_s , i tek će se onda početi transformirati u martenzit. Takav austenit, postojan između A_3 i M_s (odnosno između A_{cm} i M_s) temperatura, naziva se pothlađeni austenit (A_p). Karakteristika transformacije pothlađenog austenita u martenzit (A_p/M) je to da se odvija u određenom temperaturnom rasponu. Zbog toga treba u dijagramu ucrtati i krivulju završetka stvaranja martenzita (M_f - Martensite Finish). Na taj se način dobije tzv. Uptonov dijagram (konačni, nešto pojednostavnjeni oblik), za koji treba znati da vrijedi samo za vrlo brzo hlađenje (a ne i za ugrijavanje ili sporo hlađenje). Vrlo brzo hlađenje za ugljične čelike je (tj. za metastabilne Fe-C legure bez legirajućih dodataka) ono ohlađivanje koje se ostvaruje ohlađivanjem austenitiziranog čelika u vodi.

Ugljični čelici s manje od oko 0,6 %C gašenjem dostižu temperaturu završetka pretvorbe martenzita (M_f - temperaturu) pri temperaturi višoj od 20 °C, što znači da se on kaljenjem transformira u 100 %-tni martenzit. Ugljični čelici s 0,6 do 0,8 %C gašenjem u sredstvu temperature 20 °C (npr. u vodi sobne temperature) ne dosegnu temperaturu završetka stvaranja martenzita, pa mu se kaljena mikrostruktura (na 20 °C) sastoji od sljedećih faza:

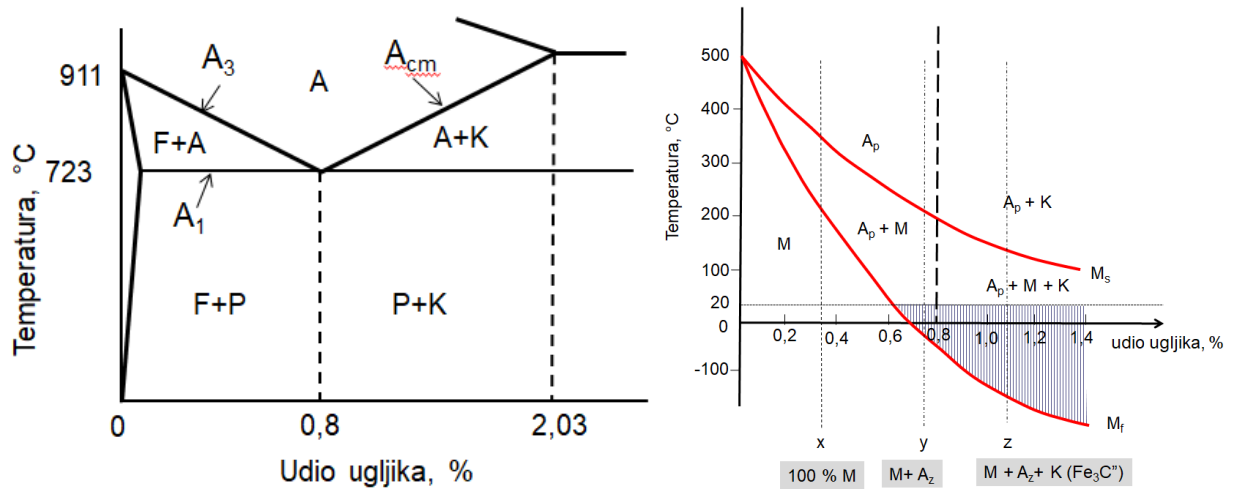
- M - martenzita
- A_z - zaostalog austenita

Prisutni, pri sobnoj temperaturi pothlađeni austenit, naziva se zaostali austenit (A_z). Ugljični čelici s više od 0,8 %C sastoje se u takvom slučaju (gašenjem do temperature 20 °C) od faza:

$M + A_z + K(Fe_3C)$.

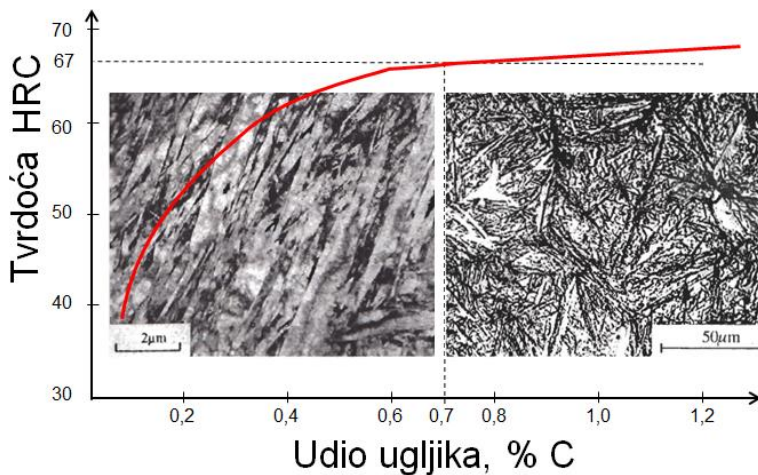
Sekundarni cementit (željezni karbid) Fe_3C prisutan je u gašenim nadeutektoidnim legurama, ako je austenitizacija bila samo djelomična, između temperatura A_1 i A_{cm} . Ako je izvedena potpuna

austenitizacija (iznad temperature A_{cm} onda se nakon nadkritičnog gašenja postiže mikrostruktura bez karbida, tj. ona se sastoji od martenzita i zaostalog austenita, $(M+A_z)$).



Slika 14. Prikaz dijela dijagrama Fe-Fe₃C i Uptonov dijagram

Tvrdoće gašenja koje se mogu postići ovise o udjelu ugljika u čeliku, i to o onom dijelu koji se otopio u austenitu, a ne i onome koji je ostao neotopljen u karbidima. Tvrdoće gašenja mogu se očitati iz Burnsova dijagrama, prikazanog na slici 15.

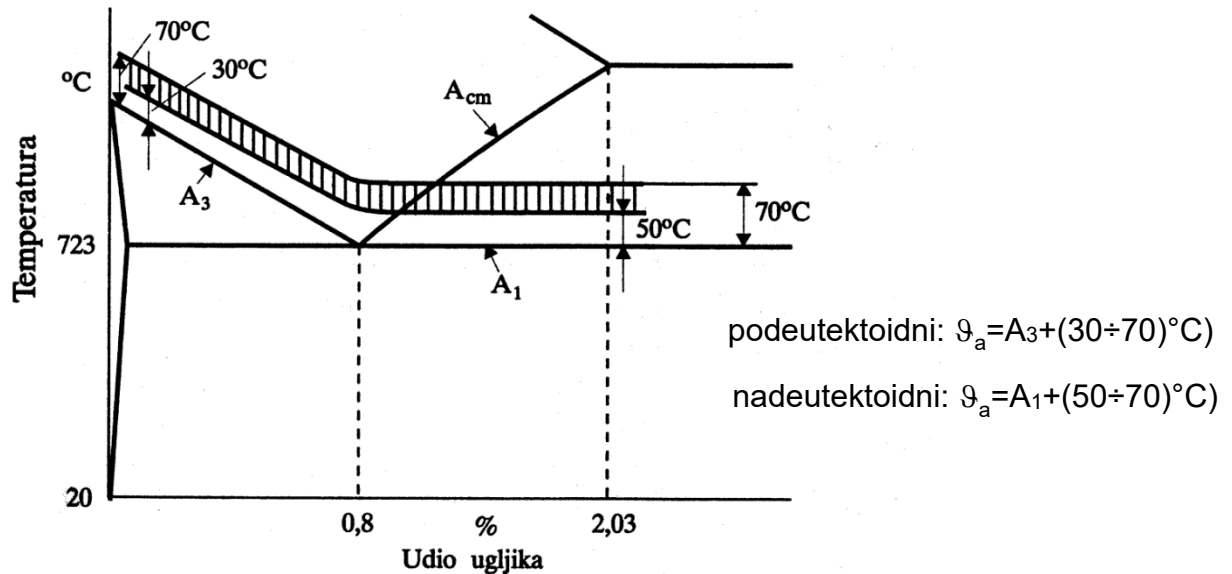


Slika 15. Burnsov dijagram tvrdoće, ovisno o sadržaju C u čeliku nakon kaljenja

4.2.2. Izbor temperature austenitizacije (ϑ_a):

Temperaturu austenitizacije određujemo:

- iz Fe-Fe₃C dijagrama za ugljične čelike, slika 16.,
- iz pripadnog pseudobinarnog dijagrama za legirane čelike,
- u praksi: na osnovu tehnoloških podloga proizvođača čelika ili eksperimentalne provjere.



Slika 16. Položaj temperatura austenitizacije za podeutektoidne i nadeutektoidne ugljične čelike

Svrha držanja na ϑ_a je omogućavanje austenitu da otopi dovoljan udio ugljika.

Izbor sredstva za gašenje: na temelju iznosa gornje kritične brzine gašenja v_{kg} iz TTT- dijagrama. Pri tome valja voditi računa da je nužno postići gornje kritično gašenje i u jezgri obratka.

Izbor sredstva za gašenje (za gašenje čelika najčešće se koristi voda, biljna i mineralna ulja, otopine polimera, solne kupke, fluidizirane kupke, inertni plinovi i zrak) ovisno o stupnju i vrsti legiranosti čelika i dimenzijama predmeta.

Empirička pravila (grubo orijentacijski podatci):

- Za $v_{kg} > 150$ °C/s – čelik treba gasiti u vodi
- Za $150 > v_{kg} > 5$ °C/s – čelik treba gasiti u ulju ili uljnoj emulziji, toploj kupki
- Za $v_{kg} < 5$ °C/s – čelik se smije hladiti na zraku ili u inertnom plinu.

4.3. TTT- dijagrami

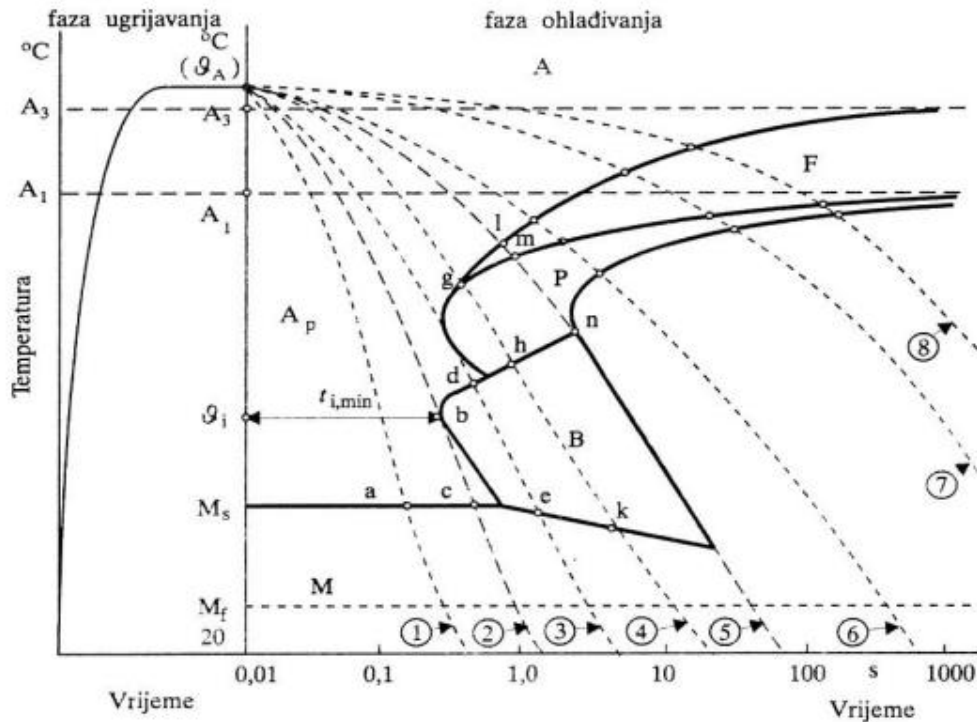
Za praćenje kontinuiranog ohlađivanja austenitiziranog čelika u realnim uvjetima (u vodi, ulju ili na zraku) primjenjuje se tzv. kontinuirani TTT-dijagram (Time Temperature Transformation = vrijeme, temperatura, pretvorba). TTT- dijagram vrijedi samo za jednu vrstu čelika i to za onaj s kojim je snimljen (tj. čelik poznatog kemijskog sastava i temperature austenitizacije). TTT- dijagram pokazuje transformacijska zbivanja u zadanom čeliku, ako se čelik iz područja austenita hladi različitim "brzinama hlađenja". Za potrebe prakse potrebno je pratiti pretvorbe austenita pri kontinuiranom hlađenju i pri izotermičkom držanju.

4.3.1. TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje

Ovaj tip TTT-dijagrama, slika 18., služi samo za praćenje promjena mikrostrukture pri neprekidnom (kontinuiranom) ohlađivanju. TTT-dijagram vrijedi samo za praćenje pojava pri ohlađivanju (brzom ili sporom), ali ne vrijedi za praćenje pojava pri ugrijavanju. Polja u kontinuiranom TTT-dijagramu predstavljaju:

- F - pretvorbu austenita u ferit
- P - pretvorbu austenita u perlit
- B - pretvorbu austenita u bainit
- M - pretvorbu austenita u martenzit.

Mjerilo apscise TTT-dijagrama je logaritmičko, jer prikazuje mikrostrukturne pretvorbe u vrlo kratkim i u vrlo dugim trajanjima. U kontinuirani TTT-dijagram ucrtavaju se različite krivulje ohlađivanja. Nakon ohlađivanja nekom krivuljom ohlađivanja, u mikrostrukтури čelika zabilježene su sve faze kroz koje je prošla promatrana krivulja. Od ucrtanih krivulja ohlađivanja za kaljenje čelika, posebno je važna ona koja osigurava da se 100 % austenita transformira u 100 % martenzita, tj. gornja kritična krivulja gašenja. Iz gornje kritične krivulje gašenja približno se može izračunati gornja kritična brzina gašenja (v_{kg} , K/s, °C/s), tj. upravo ona koja osigurava transformaciju 100 % austenita u 100 % martenzita.



$$v_{kg} = \frac{g_A - g_i}{t_{i,min}}$$

Slika 18. Prikaz kontinuiranog ohlađivanja jednog austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika u pripadnom TTT-dijagramu (F– pretvorba austenita u primarni ferit, P– pretvorba austenita u perlit, B– pretvorba austenita u bainit, M– pretvorba austenita u martenzit)

Način gašenja prikazan krivuljom 1 naziva se "nadkritičnim" gašenjem, jer se mikrostruktura nakon gašenja sastoji od 100 % martenzita (M).

Gornje kritično gašenje je ono najmanjeg intenziteta, a koje još uvijek daje konačnu strukturu gašenja 100 % mase martenzita (krivulja 2)

Krivulja gašenja po kojoj se u strukturoj smjesi više ne pojavljuje martenzit (M) naziva se **donjom kritičnom krivuljom** gašenja (krivulja 5)

Sve sporije, od donje kritične krivulje gašenja, nazivaju se **podkritične krivulje gašenja** (krivulje 6, 7 i 8).

Ovisno o izračunatoj gornjoj kritičnoj brzini gašenja odabire se sredstvo gašenja (ohlađivanja). Svako sredstvo za gašenje hladi obradak sebi svojstvenom srednjom brzinom ohlađivanja (v_{hl} , K/s, °C/s). Sredstva za gašenje, koja se obično koriste u toplinskoj obradi čelika, mogu se prema svojim fizikalnim svojstvima podijeliti na sljedeće tri skupine:

1. sredstva s vrelištem ispod temperature austenitizacije čelika (sredstva podložna Leidenfrostovu fenomenu, tj. stvaranju parnog filma oko obratka na početku gašenja):

- voda
- vodene otopine anorganskih ili organskih tvari (npr. otopine polimera)
- ulje za kaljenje
- emulzije (otopine ulja i vode)

2. sredstva s vrelištem iznad temperature austenitizacije čelika (sredstva koja ne podliježu

Leidenfrostovu fenomenu):

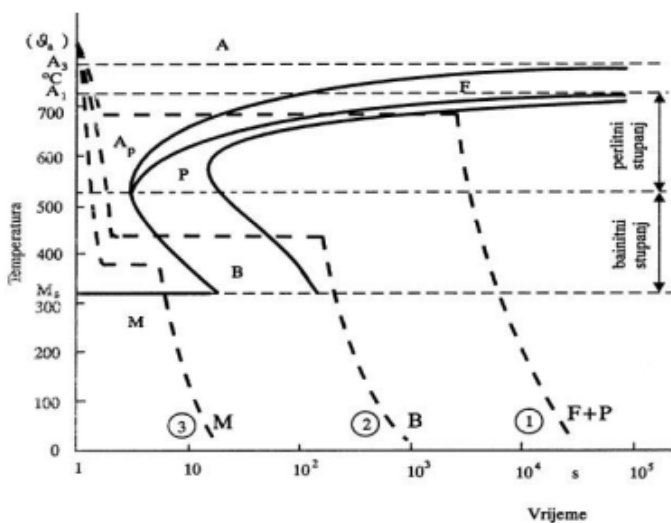
- rastaljene soli
- rastaljeni metali

1. tehnički plinovi i vakuum (sredstva koja ne podliježu Leidenfrostovu fenomenu):

- zrak (mirni, komprimirani)
- inertni plinovi: dušik, helij, argon
- fluidizirane čestice.

4.3.2. Izotermički TTT-dijagrami

Austenit se može transformirati i izotermički, ako ga se što brže pothladi na neku temperaturu izotermičke pretvorbe (ϑ_{iz}), pri čemu temperatura ϑ_{iz} treba biti ispod temperature pretvorbe A_1 , ali iznad temperature M_s , tj.: $M_s < \vartheta_{iz} < A_1$. Ako je trajanje držanja (t_{iz}) na temperaturi izotermičke pretvorbe (ϑ_{iz}) dovoljno dugo, doći će do izotermičke transformacije pothlađenog austenita u 100 % bainita. Strukturna zbivanja pri takvoj transformaciji pothlađenog austenita prikazuju izotermički TTT-dijagrami, slika 19. Za razliku od kontinuiranih TTT- dijagrama koje treba očitavati samo duž krivulja kontinuiranog ohlađivanja, izotermički se TTT- dijagrami očitavaju samo duž izotermei.



krivulja 1 - izotermičko žarenje

krivulja 2 - izotermičko poboljšavanje
(obradba na bainit, "austempering")

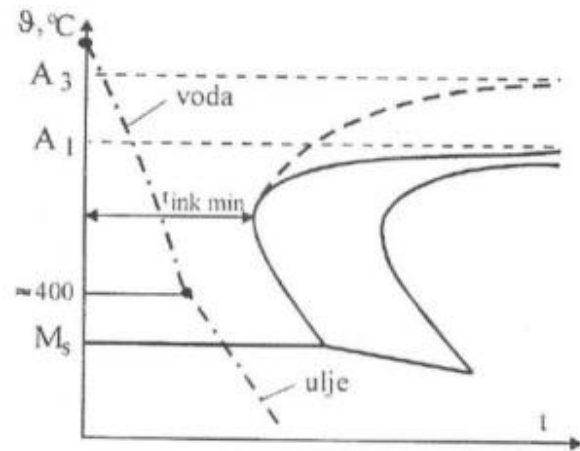
krivulja 3 - gašenje u toploj kupki
(“martempering”)

Slika 18. Izotermički TTT- dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika

Osnovna je razlika (i prednost) izotermičke obrade u odnosu na anizotermičku (kontinuiranu) u tome što se izotermičkim putem može postići jednovrsni strukturni oblik po cijelom presjeku obratka (npr. monofazna perlitna struktura ili monofazna bainitna struktura). Kontinuiranim je putem moguće, za razliku od izotermičkog, postići monofaznu strukturu martenzita, ali uz uvjet da je gašenje nadkritično i u rubnim slojevima i u jezgri.

4.4. Kaljenje sa slomljenim gašenjem

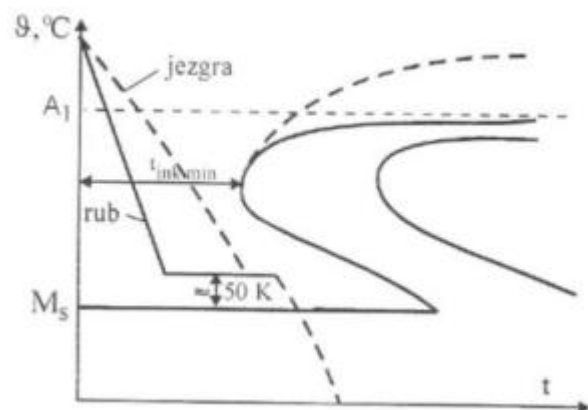
Kaljenje sa slomljenim gašenjem je postupak ugrijavanja čelika na temperaturu austenitizacije te gašenje u vodi do temperature ispod 500°C . Nakon toga se obradak prebaci u ulje i hladi do sobne temperature, kao što je prikazano na slici 19. Ovim postupkom se smanjuju unutarnja naprezanja u odnosu na postupak s kontinuiranim gašenjem.



Slika 19. Shematski prikaz „slomljenoga gašenja“ voda/ulje

4.5. Stepenasto kaljenje

Stepenasto kaljenje (martempering), slika 20., je postupak ugrijavanja, a potom gašenja u toploj kupki na temperaturi θ_k (dok se temperatura cijelog presjeka obrtka ne izjednači s temperaturom kupke) i sporog hlađenja na zraku. Ova tehnika gašenja uzrokuje najmanje deformacije oblika i najmanje smanjenje toplinskih naprezanja.



Slika 20. Gašenje u toploj kupki (martempering)

Kaljenje se obično provodi do sobne temperature. Većina srednje ugljičnih čelika i niskolegiranih čelika postiže transformaciju u 100% martenzita na sobnoj temperaturi. Ipak, visokouglični čelici i visokolegirani čelici imaju na sobnoj temperaturi još uvijek i određeni udio zaostalog austenita. Kod kaljenja s kontinuiranim i dubokim hlađenjem (Cryogenic) materijal se podvrgava niskim temperaturama (obično do -75°C) i cijela struktura postaje martenzitna. Osim kaljenja cijele mase strojnog dijela, u praksi se primjenjuju i postupci lokalnog (površinskog) kaljenja, kada kaljenjem trebaju otvrdnuti samo neki dijelovi proizvoda. Pri tome se primjenjuju plinski plamenici, inducirana električna energija, laserski snop i snop elektrona, slika 22..



Slika 21. Primjer površinski kaljenjih dijelova (<http://www.oven-set.si>)

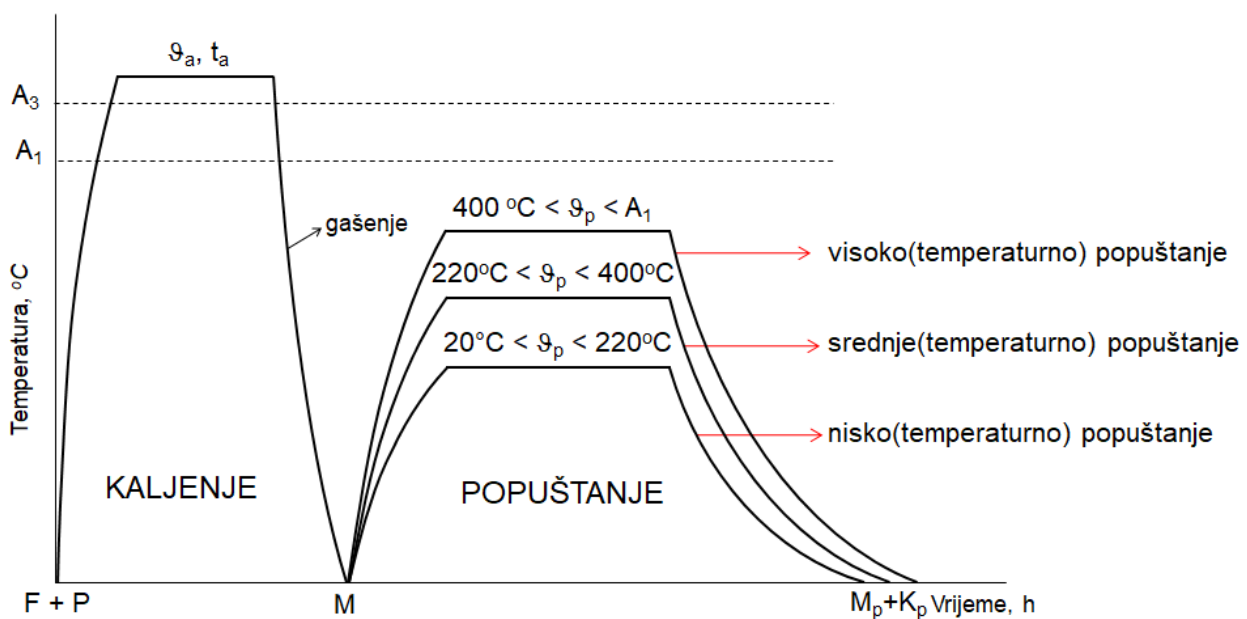
5. Popuštanje čelika

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na temperaturu ispod temperature A_1 i sporog hlađenja sa zadaćom:

- povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem,
- sniženja (redukcije) vlastitih zaostalih naprezanja martenzita,
- postizanja dimenzijske postojanosti (kod visokolegiranih alatnih čelika pretvorbom zaostalog austenita u martenzit i karbid popuštanja).

Nužna posljedica popuštanja je sniženje tvrdoće postignute kaljenjem. Prema visini temperature popuštanja (ϑ_p) postupci popuštanja se dijele na:

- niskotemperaturno popuštanje ($\vartheta_p < 220^\circ\text{C}$)
- srednjetemperaturno popuštanje ($220^\circ\text{C} < \vartheta_p < 400^\circ\text{C}$)
- visokotemperaturno popuštanje ($400^\circ\text{C} < \vartheta_p < A_1$), kao što je prikazano na slici 22



Slika 22. T- t dijagram popuštanja čelika

Niskotemperaturno popuštanje: svrha ovog postupka je popuštanje unutarnjih naprezanja i povećanje žilavosti. Ugrijavanje martenzita na neku temperaturu popuštanja omogućava izvjesnu difuziju atoma ugljika pri niskim temperaturama popuštanja, zbog čega u nekim rešetkama dolazi do snižavanja stupnja tetragonalnosti, u odnosu na gašeno stanje (jer se atom ugljika smjestio na povoljnije mjesto), a u drugim rešetkama stupanj tetragonalnosti poprimio je vrijednost 1 (jer je atom ugljika izašao iz rešetke). Snižavanje stupnja tetragonalnosti (c/a) nekih rešetaka, na nižu od one nakon kaljenja (ali još

uvijek višu od 1), a preostalih rešetaka na vrijednost $c/a=1$ ima za posljedicu:

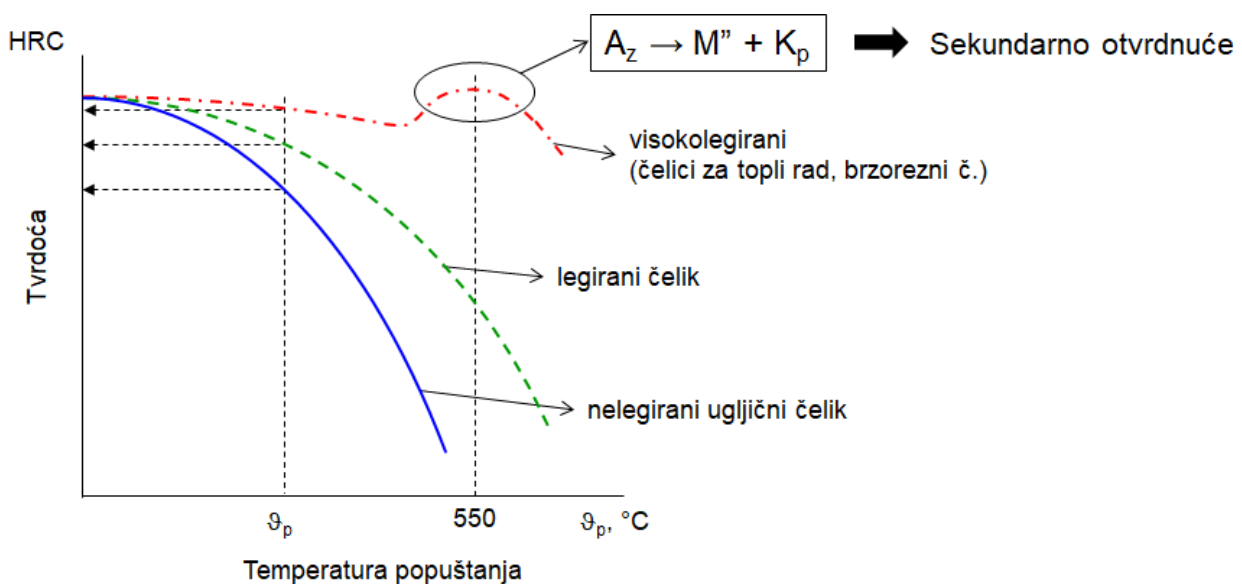
- povišenje žilavosti popuštenog martenzita,
- sniženje zaostalog naprežanja popuštenog martenzita i sniženje tvrdoće (što je nepoželjno ali i neizbježno).

Niskotemperaturno popuštanje se primjenjuje kod toplinske obrade ugljičnih čelika i kod niskolegiranih alatnih čelika.

Srednjetemperaturno popuštanje: prilikom ovog postupka struktura čelika se mijenja, dolazi do smanjenja tvrdoće i čvrstoće materijala te povećanja žilavosti i produljenja. Ovaj postupak se najčešće primjenjuje za opružne čelike.

Visokotemperaturno popuštanje: primjenjuje se za postizanje boljih svojstava čvrstoće i udarne žilavosti, a primjenjuje se kod visokolegiranih alatnih i brzoreznih čelika za poboljšavanje njihovog rada u toplom stanju.

Na slici 23. prikazan je dijagram popuštanja za različite kvalitete čelika.

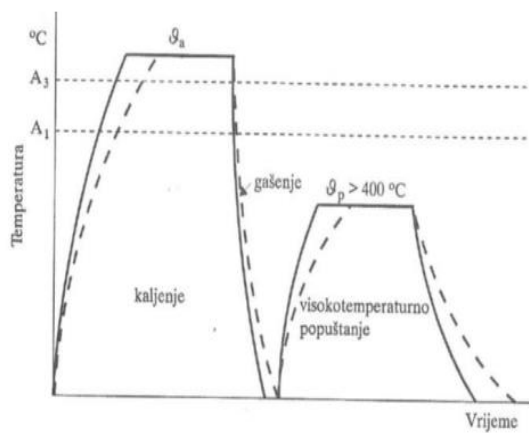


Slika 23. Dijagram popuštanja za različite kvalitete čelika

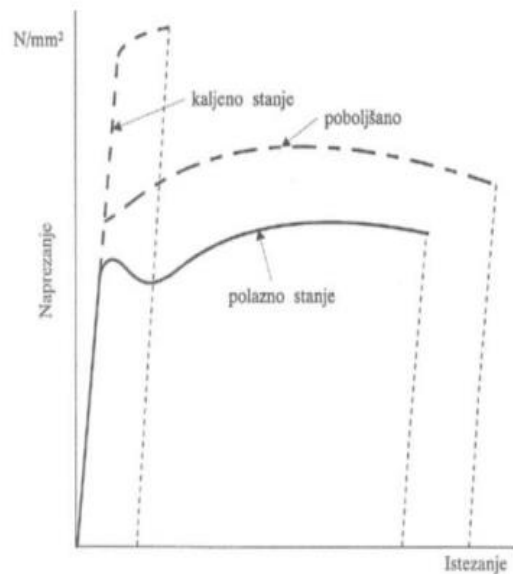
6. POBOLJŠAVANJE

Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja, s namjerom postizanja visoke granice tečenja i visoke žilavosti. Ovim postupkom toplinski se obrađuju ugljični, odnosno niskolegirani čelici, za poboljšavanje s 0,3 do 0,6 %C (samo podeutektoidni čelici). Na slici 24. prikazan je postupak poboljšavanja čelika, a na slici 25. usporedba mehaničkih svojstava za različita stanja nakon provedene toplinske obrade.

Rezultati poboljšavanja (visina žilavosti i visina granice tečenja) bit će bolji ako je čelik gašenjem jednoličnije prokaljen.



Slika 24. Dijagram postupka poboljšavanja čelika



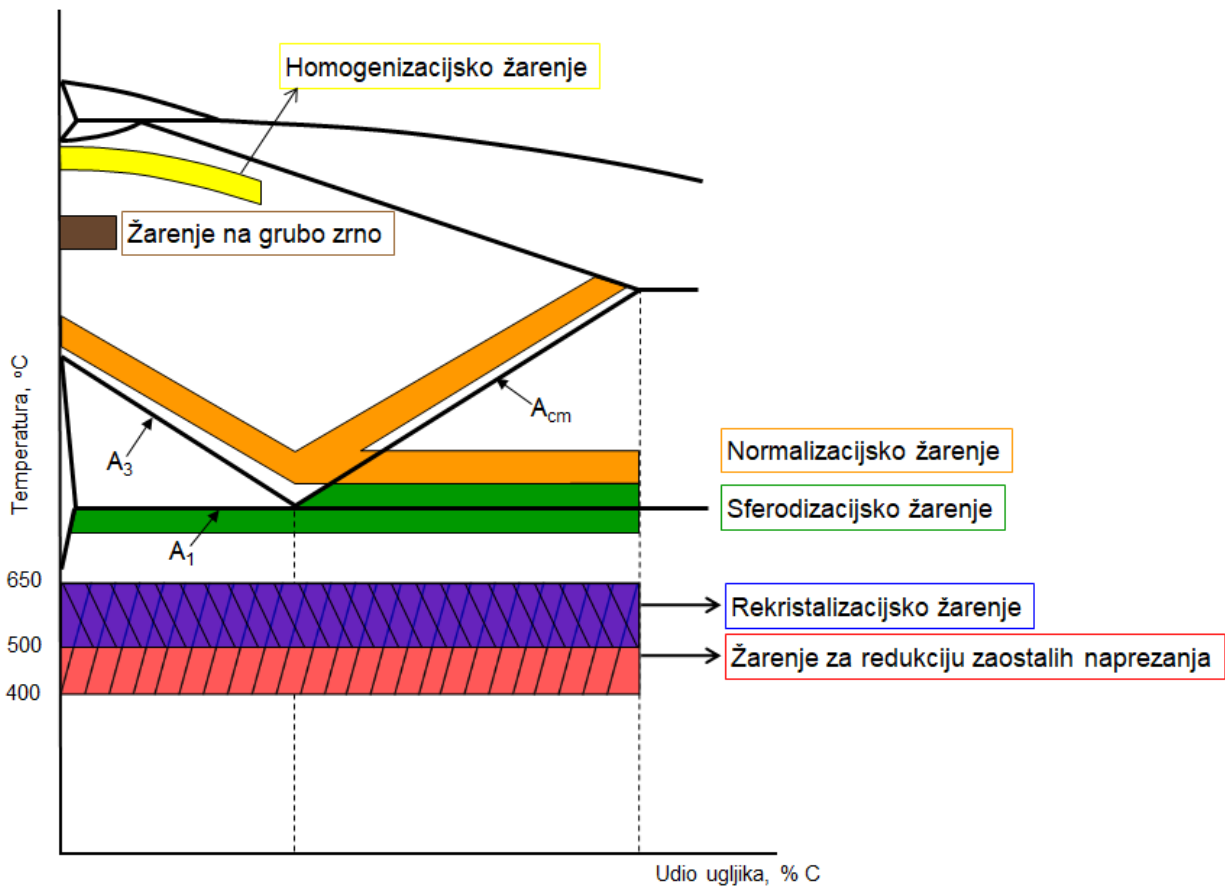
Slika 25. Usporedba dijagrama naprezanje-istezanje za različita stanja toplinski obrađenih čelika

7. POSTUPCI ŽARENJA

Postupci žarenja se dijele u dvije skupine:

- postupci žarenja I vrste koji se provode na temperaturama ispod A_1 (žarenje za redukciju zaostalih naprezanja i rekristalizacijsko žarenje). Kod ovih postupaka nema promjena u kristalnoj rešetci materijala (nema prekristalizacije)
- postupci žarenja II vrste provode se na temperaturama oko i iznad A_1 (sferoidizacijsko (meko) žarenje, normalizacijsko žarenje, žarenje na grubo zрно (visokotemperaturno žarenje) i homogenizacijsko (difuzijsko) žarenje). Kod ovih postupaka dolazi do prekristalizacije mikrostrukture.

Na slici 26. prikazani su postupci žarenja u dijagramu temperatura- sadržaj ugljika.



Slika 26. Prikaz postupaka žarenja ovisno o temperaturi za različite sadržaje ugljika

7.1. Žarenje za redukciju zaostalih napreznja

Zaostala napreznja u obradcima mogu prouzročiti štetne posljedice na izradak (deformacije, pucanje dijelova). Žarenje za redukciju zaostalih napreznja izvodi se radi razgradnje zaostalih napreznja (napetosti) nastalih tijekom deformiranja, pri obradi odvajanjem čestica ili pri brzom ohlađivanju nakon toplinske obrade, zavarivanja i sl. Pri tome ne dolazi do bitnijih promjena mehaničkih svojstava strojnih dijelova niti do mikrostrukturnih promjena. Kod čelika postupak se provodi na temperaturama od 400 do 650 °C, najčešće traje dva (ponekad i više) sati, a ohlađuje se vrlo sporo, kako pri hlađenju ne bi došlo do stvaranja novih toplinskih napreznja.

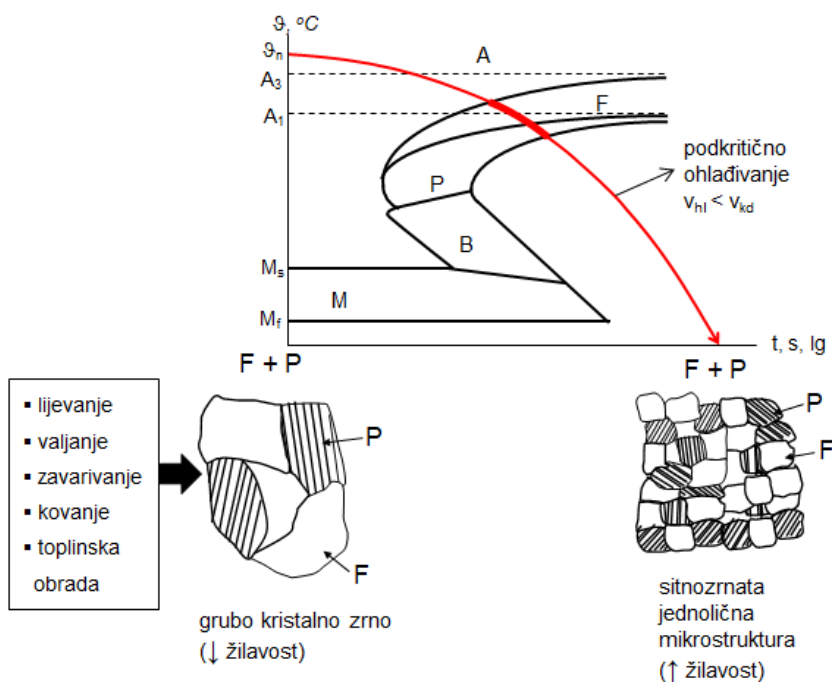
7.4. Normalizacijsko žarenje

Normalizacijsko žarenje (normalizacija) je postupak ugrijavanja čelika te podkritičnog ohlađivanja (sporije od donje kritične brzine ohlađivanja, u pravilu na zraku), kako bi se postigla sitnozrnata i jednolična mikrostruktura. Normalizacija se primjenjuje ako bi nekada, pri postupcima prerade (toplo kovanje ili valjanje), toplinske obrade ili zavarivanja, došlo do pogrubljenja kristalnog zrna, čime bi se snizila žilavost čelika.

Temperatura normalizacijskog žarenja:

- podeutektoidnih čelika $\vartheta_n = A_3 + (30 \dots 70) \text{ } ^\circ\text{C}$
- nadeutektoidnih čelika $\vartheta_n = A_1 + (50 \dots 70) \text{ } ^\circ\text{C}$
- ili za otapanje karbidne mreže $\vartheta_n = A_{cm} + (10 \dots 20) \text{ } ^\circ\text{C}$

Nakon žarenja je potrebno potkritično ohlađivanje ($v_{hl} < v_{kd}$ - na zraku) kako bi se postigla **sitnozrnata** i **jednolična** mikrostruktura, kako je prikazano na slici 29.



Slika 29. Dijagram postupka normalizacijskog žarenja za podeutektoidni čelik

7.5. Žarenje na grubo zrno (visokotemperaturno žarenje)

Žarenjem na grubo zrno (visokotemperaturno žarenje) postiže se grubo zrno niskougličnih čelika, koji su u tom stanju lakše obradivi odvajanjem čestica (rezanjem). Takvo stanje čelika je samo među – stanje, a nakon strojne obrade najčešće ga treba nekom drugom toplinskom obradom dovesti u prikladno stanje (npr. normalizacijom).

7.6. Homogenizacijsko (difuzijsko) žarenje

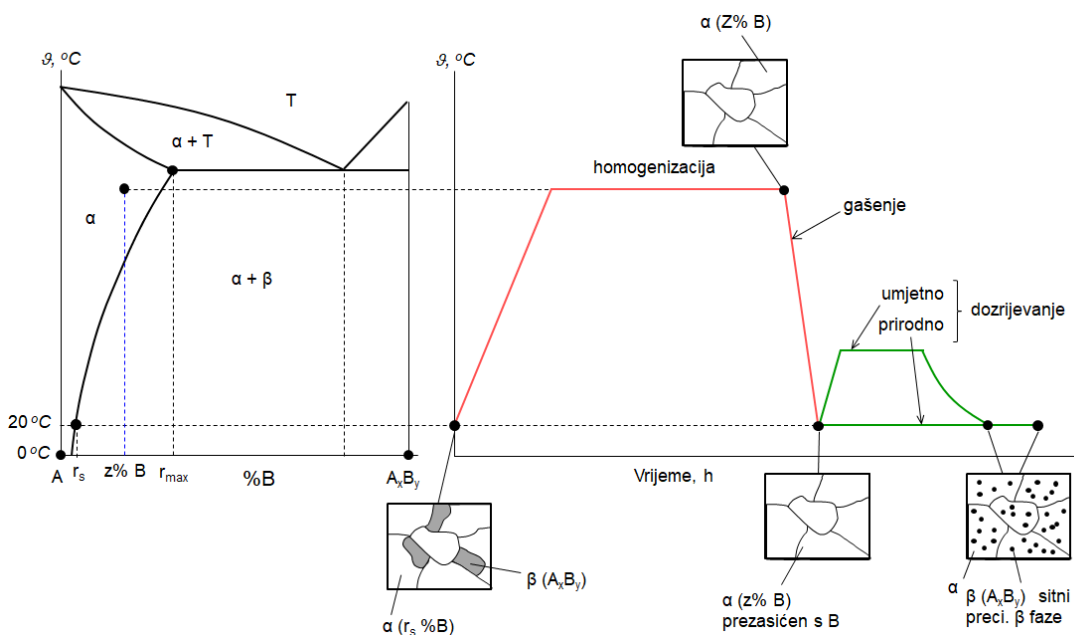
Tijekom skrućivanja čelika može doći do pojave neujednačenog kemijskog sastava, koji uzrokuje razliku u svojstvima unutar mikrostrukture. Zbog toga je potrebno ujednačiti sastav homogenizacijskim žarenjem. Homogenizacijskim žarenjem, koje se izvodi pri temperaturi malo ispod temperature solidusa, postiže se homogenizacija sastava i izjednačavanje svojstava u masi čelika. Ova su žarenja dugotrajna, mogu trajati po nekoliko dana, te se najčešće izvode u metalurškim pogonima. Nakon ovog žarenja zрно je vrlo grubo, tako da ga naknadno treba usitniti normalizacijskim žarenjem.

7.7. Precipitacijsko očvršćivanje (očvršćivanje izlučivanjem)

Postupkom precipitacije kod nekih je metala (visokolegiranih čelika, legura bakra, aluminija, titana, kobalta i nikla) moguće povećati mehaničku otpornost, slika 30. Postupak se sastoji od homogenizacije, gašenja, te prirodnog ili umjetnog dozrijevanja (starenja).

Uvjeti precipitacijskog očvršćivanja:

- topivost (rastvorljivost) B u čvrstoj otopini osnovnog kristala mješavnica $\uparrow \vartheta$,
- Me tvori intermetalni spoj A_xB_y ,
- heterogena legura na sobnoj temperaturi.



Slika 30. Prikaz postupka precipitacijskog očvršćivanja

8. Ispitivanje materijala

Metalni materijali najviše se upotrebljavaju u tehničkoj praksi zbog povoljnih mehaničkih, tehnoloških, fizikalnih, kemijskih i drugih svojstava. U strojarstvu su temeljna svojstva materijala mehanička: tvrdoća, čvrstoća, granica razvlačenja, istezljivost, žilavost i dr. Mehanička svojstva materijala predstavljaju mjerljivu veličinu materijala, koja se može brojčano odrediti pomoću normiranih metoda ispitivanja.

8.1. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće jedna je od najraširenijih metoda ispitivanja materijala. Ispitivanje se lako i brzo provodi, nisu potrebni ispitni uzorci, a rezultati ispitivanja mogu poslužiti za procjenu drugih mehaničkih svojstava (npr. vlačne čvrstoće ili otpornosti na abrazijsko trošenje). Postoji više definicija tvrdoće, no osnovna, koja je i primijenjena u glavnim tehničkim metodama mjerenja tvrdoće, glasi: Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju stranog tijela u njegovu površinu. Metode mjerenja tvrdoće, koje se danas najviše koriste, su:

- statičke (Brinellova, Vickersova i Rockwelova)- sila ispitivanja koja djeluje na penetrator, postepeno raste do maksimalne vrijednosti.
- dinamičke (Poldi i Shore)- sila na penetratoru ostvaruje se udarom ili se tvrdoća određuje na osnovi elastičnog odskoka penetratora od površine koja se ispituje.

8.1.1. Statička metoda mjerenja tvrdoće - Brinellova metoda

Ova metoda se koristi za meke i materijale srednje tvrdoće. Kod ove metode penetrator je kuglica od kaljenog čelika (za tvrdoće do 450 HB) ili od tvrdog metala (za tvrdoće do 650 HB) promjera D koja se utiskuje silom F u površinske slojeve materijala, slika 31. U ispitivanom materijalu nastaje otisak u obliku kalote, promjera baze d i dubine h. Tvrdoća po Brinellu (oznaka HB) je omjer primijenjene sile i površine kalote- otiska:

$$HB = \frac{F \cdot 0,102}{S} = \frac{F \cdot 0,204}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

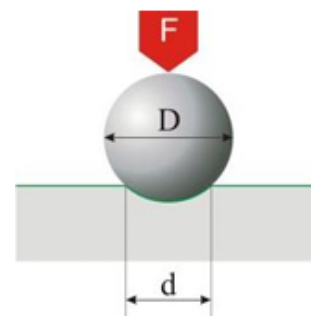
Gdje je:

F- sila utiskivanja [N],

S- površina kalote- otiska [mm²],

D- promjer kuglice [mm],

d- promjer baze kugline kalote (otiska) [mm].



Slika 31. Sematski prikaz Brinellove metode

Tvrdoća se određuje očitavanjem iz usporednih tablica na osnovi promjera kuglice D, sile utiskivanja F i promjera kalote d. Normirani promjeri kuglice D su 10, 5, 2,5, 2 i 1 mm, a mjerenje je valjano ako promjer otiska d iznosi 0,25 do 0,6 D, pa ovisno o tvrdoći materijala treba varirati i silu F.

Prednosti Brinellove metode:

- Lako mjerenje veličine otiska - dovoljna mjerna lupa
- Jednostavna priprema površine - dovoljno je grubo brušenje.

Nedostaci Brinellove metode:

- Ne mogu se mjeriti materijali tvrdoće ≥ 650 HB,
- Tvrdoća je ovisna o opterećenju,
- Nakon mjerenja otisak je velik i ostavlja vidljiv trag na površini.

8.1.2. Statička metoda mjerenja tvrdoće - Vickersova metoda

Kod Vickersove metode uklonjena su dva osnovna nedostatka Brinellove metode: ograničenost područja mjerenja (upotrebom dijamantnog penetratora) i ovisnost tvrdoće o sili utiskivanja (oblikom penetratora- četverostrana piramida s vršnim kutom 136°), slika 32. Ova metoda je univerzalna i primjenjuje se za tvrde i meke materijale. Tvrdoća po Vickersu (oznaka HV) je omjer primijenjene sile i površine otiska koji ostavlja dijamantna piramida:

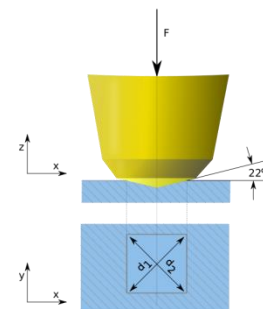
$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S} = \frac{F \cdot 0,189}{d^2}$$

Gdje je:

F- sila utiskivanja [N],

S- površina otiska koji ostavlja dijamantna piramida [mm^2],

d- dijagonala otiska [mm].



Slika 32. Sematski prikaz Vickersove metode

Trajanje opterećenja iznosi 10 do 15 s, a iznimno za mekane materijale može se produžiti, a tvrdoća se određuje očitavanjem iz usporednih tablica na temelju sile utiskivanja F i dijagonale otiska d.

U tablici 10. navedene su vrijednosti koje se mogu primjenjivati kod mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom.

Tablica 10. Razine ispitnih sila mjerenih Vickersovom metodom

Razina ispitnih sila F , N	Oznaka tvrdoće	Naziv	Tip mjerenja
$49 \leq F < 980$	$\geq HV5$	Makrotvrdoća	Uopćena
$1,961 \leq F < 49$	HV0,2 do <HV5	Semimikrotvrdoća	Tanki uzorci
$0,098 \leq F < 1,961$	HV0,01 do <HV0,2	Mikrotvrdoća	Pojedinih faza u mikrostrukturi

Prednosti Vickersove metode:

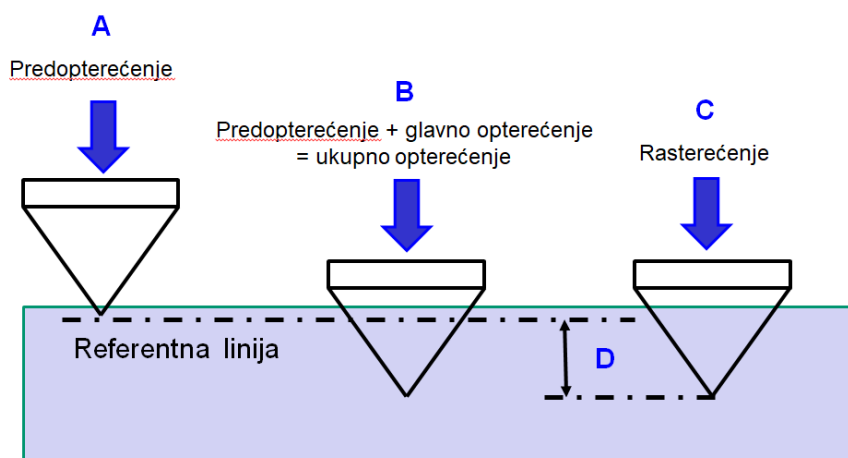
- univerzalna metoda,
- mogućnost mjerenja vrlo tankih i vrlo tvrdih materijala,
- otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu.

Nedostatci Vickersove metode:

- potrebna posebna priprema ispitne površine,
- potreban mjerni mikroskop za očitavanje dijagonala otiska,
- mogućnost loma dijamantne piramide.

8.2. Statička metoda mjerenja tvrdoće- Rockwellova metoda

Za razliku od Brinellove i Vickersove metode, kod Rockwellove metode ne mjeri se veličina otiska, nego dubina prodiranja penetratora. Trajanje jednog ispitivanja je 10 sekundi, a vrijednost tvrdoće očitava se neposredno na skali tvrdomjera nakon rasterećenja. Na slici 33. shematski je prikazan princip mjerenja tvrdoće Rockwellovom metodom.



Slika 33. Shematski prikaz Rockwellove metode mjerenja tvrdoće

Kod Rockwellove metode upotrebljava se više vrsta penetratora:

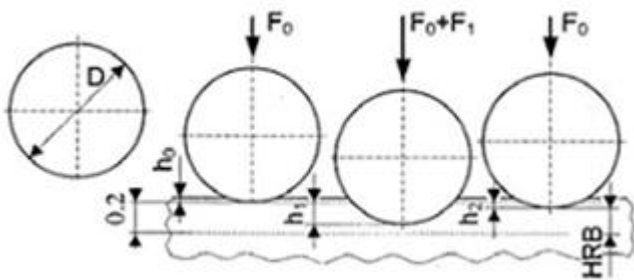
- za meke materijale čelična kuglica promjera 1/16", 1/8", 1/4" i 1/2" (HRB- metoda)
- za tvrde materijale dijamantni stožac s vršnim kutom 120 ° i radijusom zaobljenja 0,2 mm (HRC- metoda).

8.2.1. Rockwellova HRB- metoda

Ova metoda koristi se za meke i srednje tvrde materijale (aluminij, meki čelik i sl.). Postupak mjerenja tvrdoće odvija se u tri faze:

- Prva faza– predopterećenje $F_0 = 98 \text{ N}$ (10 kp), penetrator (čelična kuglica) prodire na dubinu h_0 koja predstavlja početni položaj za mjerenje dubine prodiranja.
- Druga faza– glavno opterećenje $F_1 = 883 \text{ N}$ (90 kp) koje se dodaje na predopterećenje ($F_0 + F_1 = 981 \text{ N}$ (100 kp)) utiskuje penetrator na dubinu h_1 .
- Treća faza - rasterećenje, tj. otklanjanje glavnog opterećenja F_1 . Dolazi do povrata elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrator se zaustavlja na dubini h_2 ($h_2 < h_1$) kao što je prikazano na slici 34.

Ukupna moguća dubina prodiranja penetratora iznosi 0,26 mm i podijeljena je na 130 dijelova. Mjerno područje HRB-metode je od 35 do 100 HRB.



Slika 34. Shematski prikaz Rockwellove HRB- metode mjerenja tvrdoće

8.2.2. Rockwellova HRC- metoda

Ova metoda koristi se za tvrde materijale (npr. toplinski obrađeni čelici). Postupak mjerenja tvrdoće odvija se u tri faze:

- Prva faza– predopterećenje $F_0 = 98 \text{ N}$ (10 kp), penetrator (dijamantni stožac s kutom od 120°)

prodire na dubinu h_0 koja predstavlja početni položaj za mjerenje dubine prodiranja.

- Druga faza– glavno opterećenje $F_1 = 1373 \text{ N}$ (140 kp) koje se dodaje na predopterećenje ($F_0 + F_1 = 1471 \text{ N}$ (150 kp)) utiskuje penetrator na dubinu h_1 .
- Treća faza- rasterećenje, tj. otklanjanje glavnog opterećenja F_1 . Dolazi do povrata elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrator se zaustavlja na dubini h_2 ($h_2 < h_1$) kao što je prikazano na slici 35.

Ukupna moguća dubina prodiranja penetratora iznosi 0,2 mm i podijeljena je na 10 dijelova.

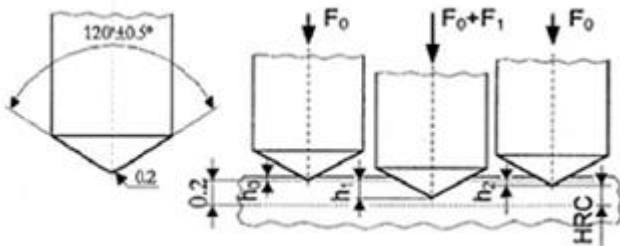
Mjerno područje HRC-metode je od 20 do 70 HRC.

Prednosti Rockwellove metode:

- mjerenje je brzo, tvrdoća se očitava na skali tvrdomjera,
- nije potrebna priprema mjerne površine.

Nadostatci Rockwellove metode:

- mogućnost loma dijamantnog stošca,
- nepreciznost $\pm 2 \text{ HRB/HRC}$.



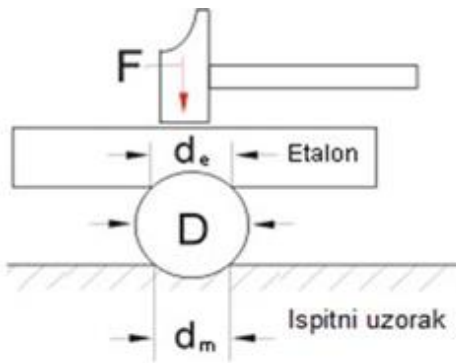
Slika 35. Shematski prikaz Rockwellove HRC- metode mjerenja tvrdoće

8.2.3. Dinamičke metode mjerenja tvrdoće- Poldi metoda

Mjerenje tvrdoće je zasnovano na udarnom djelovanju penetratora i omogućuje izračunavanje tvrdoće slično tvrdoći po Brinellovoj metodi. Poldi metoda je u principu modificirana Brinellova metoda.

"Poldijev čekić" istovremeno utiskuje penetrator (čelična kuglica promjera 10 mm) u površinu ispitnog uzorka i etalon poznate tvrdoće.

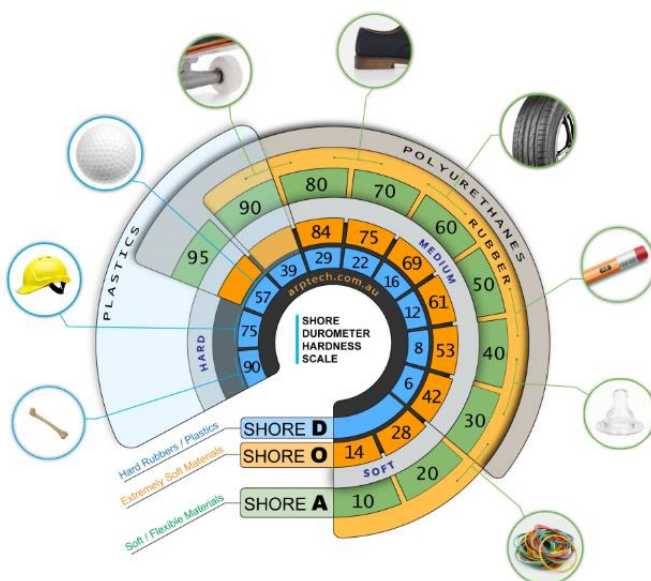
Mjerenjem promjera otiska (pomoću lupe) d_e i d_m određuje se tvrdoća ispitnog uzorka pomoću usporednih tablica. Razlika izmjerenih vrijednosti tvrdoća po Brinellovoj i Poldi metodi nije veća od 2%. Ova metoda daje rezultate koji za praksu imaju zadovoljavajuću točnost. Slika 36. shematski je princip mjerenja tvrdoće metodom Poldi.



Slika 36. Shematski prikaz Poldi metode mjerenja tvrdoće

8.2.4. Dinamičke metode mjerenja tvrdoće– Shore metoda

Princip mjerenja tvrdoće, po ovoj metodi, zasnovan je na elastičnom odskoku penetratora i na mjerenju visine prvog odskoka. Uređaj za mjerenje tvrdoće (skleroskop) sastoji se iz jedne staklene cijevi duljine 245 mm, podijeljene na 130 dijelova, u kojoj se nalazi penetrator mase 2.5 g s dijamantnim stožastim vrhom. Pri mjerenju tvrdoće penetrator slobodno pada bez trenja kroz staklenu cijev na površinu ispitnog uzorka. Visina prvog odskoka penetratora izražena u dijelovima mjerne skale predstavlja mjeru odskočne tvrdoće. Vrijednost tvrdoće ispitnog uzorka računa se kao aritmetička sredina pet pojedinačnih mjerenja. Na osnovi srednje vrijednosti elastičnog odskoka penetratora, može se tvrdoća po Shoru preračunati u tvrdoću po Vickersu. Za različite materijale, zavisno od tvrdoće, primjenjuju se različite skale Shor metode, kao što je prikazano na slici 37.



Slika 37. Vrijednosti tvrdoće po Shoru, za različite skale

Literatura

1. B. Liščić, M. Stupnišek, F. Cajner, T. Filetin: Toplinska obrada- Praktikum, Sveučilište u Zagrebu 1992.
2. M. Stupnišek, F. Cajner: Osnove toplinske obrade metala, Sveučilište u Zagrebu 2017..
3. D. Krumes: Toplinska obradba, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
4. V. Löpple: Wärmebehandlung des Stahles, Europla Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH&Co. KG, Haan-Gruiten, 2006.
5. G. Kraus: Steels: Heat Treatment and Processing Principles, ASM International, Metals Park, Ohio, 1989.

Kazalo slika

Slika 1. Shematski prikaz visoke peći.....	4
Slika 2: Proizvodi visoke peći te podjela sirovog željeza s obzirom na sastav tj. mikrostrukturu	6
Slika 3. Prikaz prostorno i plošno centrirane kubne rešetke željeza	16
Slika 4. Fazni Fe- Fe ₃ C dijagram za metastabilnu ravnotežnu kristalizaciju	17
Slika 5. Prikaz faznog Fe- Fe ₃ C dijagrama s područjima Fe-C legura	20
Slika 6. Sustavi Fe-Le: a) sustav Fe-C (metastabilni, za usporedbu) b) sustav Fe-Ni (prošireno γ područje) c) sustav Fe-Cr (prošireno α područje)	21
Slika 7. Utjecaj legirnih elemenata na temperaturu pretvorbe austenita u ferit (A1)	22
Slika 8. Utjecaj legirnih elemenata na eutektoidnu koncentraciju ugljika (točka S) i maksimalnu otopivost ugljika u austenitu (točka E)	22
Slika 9. Pseudobinarni dijagram čelika legiranog s 2 %Mn	23
Slika 10. Opći dijagram postupka toplinske obrade	24
Slika 11. Dijagram postupka kaljenja čelika s kontinuiranim gašenjem	25
Slika 12. Bainovo tumačenje distorzija fcc-bcc-bct rešetke	26
Slika 13. Stupanj tetragonalnosti martenzitne bct rešetke	26
Slika 14. Prikaz dijela dijagrama Fe- FeC ₃ i Uptonov dijagram	28
Slika 15: Burnsov dijagram tvrdoće, ovisno o sadržaju C u čeliku nakon kaljenja	28
Slika 16. Položaj temperatura austenitizacije za podeutektoidne i nadeutektoidne čelike	29
Slika 17. Prikaz kontinuiranog ohlađivanja jednog austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika u pripadnom TTT-dijagramu	31
Slika 18. Izotermički TTT-dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika	32
Slika 19. Shematski prikaz „slomljenoga gašenja“ voda/ulje	33
Slika 20. Gašenje u toploj kupki (martempering)	33
Slika 21. Primjer površinski zakaljenih dijelova (http://www.oven-set.si)	34
Slika 22. T- t dijagram popuštanja čelika	35
Slika 23. Dijagram popuštanja za različite kvalitete čelika	36

Slika 24. Dijagram postupka poboljšavanja čelika	37
Slika 25. Usporedba dijagrama naprezanje-istezanje za različita stanja toplinski obrađenih čelika	37
Slika 26. Prikaz postupaka žarenja ovisno o temperaturi za različite sadržaje ugljika	38
Slika 27. Shematski prikaz promjena tijekom rekristalizacijskog žarenja	39
Slika 28. Dijagram postupka sferoidizacijskog žarenja za neki nadeutektoidni čelik	39
Slika 29. Dijagram postupka normalizacijskog žarenja za podeutektoidni čelik	40
Slika 30. Prikaz postupka precipitacijskog očvršćivanja	41
Slika 31. Sematski prikaz Brinellove metode	42
Slika 32. Sematski prikaz Vickersove metode	43
Slika 33. Shematski prikaz Rockwellove metode mjerenja tvrdoće	44
Slika 34. Shematski prikaz Rockwellove HRB metode mjerenja tvrdoće	45
Slika 35. Shematski prikaz Rockwellove HRC metode mjerenja tvrdoće	46
Slika 36. Shematski prikaz Poldi metode mjerenja tvrdoće	47
Slika 37. Vrijednosti tvrdoće po Shoru za različite skale	47

Kazalo tablica

Tablica 1: Značenje simbola na drugom mjestu u oznaci čelika s nezajamčenim kemijskim sastavom	8
Tablica 2: Simboli i redni broj kemijskih elemenata u oznaci čelika sa zajamčenim kemijskim sastavom	9
Tablica 3: Oznaka čelika prema europskoj normi EN 100027-1	10
Tablica 4: Dodatne oznake za čelični proizvod, ovisno o skupini čelika	11
Tablica 5: Oznake posebnih zahtjeva	12
Tablica 6: Oznake stanja čelika	12
Tablica 7: Oznaka čelika prema namjeni te mehaničkim i fizičkim svojstvima	12-13
Tablica 8: Označavanje čelika prema kemijskom sastavu	14
Tablica 9: Prikaz mikrostrukturnih faza koje se pojavljuju u Fe- Fe ₃ C dijagramu	17
Tablica 10: Razine ispitnih sila Vickersove metode	43

Popis ključnih pojmova

Čelici, Označavanje čelika, toplinska obrada, kaljenje, martenzit, žarenje, tvrdoća, Brinell, Vickers, Rockwell, Poldi, Shore....

Impresum

Autori: Prof. dr. sc. Božidar Matijević, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 1, Zagreb, bozidar.matijevic@fsb.hr

Lektor: Gordana Hajni, prof.

Recenzent: Prof. dr. sc, Mladen Stupnišek, mladen.stupnisek@gmail.com, www.feliksmetal.hr