

Određivanje optimalnih parametara poboljšavanja konstrukcijskih čelika

Havidić, Goran

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:300337>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-19**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
Stručni studij Strojарstva

Goran Haviđić

**Određivanje optimalnih
parametara poboljšavanja
konstrukcijskih čelika**

Završni rad

Karlovac, 2015 godina.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODIJEL
Stručni studij Strojарstva

Goran Haviđić

**Određivanje optimalnih
parametara poboljšavanja
konstrukcijskih čelika**

Završni rad

Dipl.ing. Tomislav Božić

Karlovac, 2015 godina.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

*Stručni / specijalistički studij:
(označiti)*

Stručni studij

Usmjerenje: Proizvodno strojarstvo.

Karlovac, 14.10.2015.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Goran Havičić

Matični broj: 0110610113

*Naslov:..ODREĐIVANJE OPTIMALNIH PARAMETARA POBOLJŠAVANJA KONSTRUKCIJSKIH
ČELIKA*

Opis zadatka:

Završnim radom definirati optimalne parameter poboljšavanja tri vrste konstrukcijskih čelika sukladno planu pokusa. Teorijski obraditi konstrukcijske čelike kao i vrste i načine ispitivanja mehaničkih svojstava. U eksperimentalnom dijelu rada analizirati svojstva čelika I kemijske sastave zadanih materijala, izvršiti toplinske obrade te konačno izvršiti ispitivanje mehaničkih svojstava. Usporedbom poznatih karakteristika I dobivenih rezultata zaključiti koji od parametara Toplinske obrade možemo proglasiti optimalnim

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

16.07.2015.

01.11.2015.

15.11.2015.

*Mentor:
Tomislav Božić, dipl.ing.*

*Predsjednik Ispitnog povjerenstva:
Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.*

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru dipl.ing. Tomislavu Božiću na mentorstvu i stručnoj pomoći, asistentici bacc.ing.mech Ani Fudurić na pomoći u izradi ovog rada, te profesorici mag.ing.stroj. Tihani Kostadin na pomoći u izradi eksperimenta.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji na podršci i motivaciji tijekom čitavog školovanja.

Goran Haviđić

SAŽETAK

Ovim završnim radom ispitan je utjecaj toplinske obrade poboljšavanja na svojstva konstrukcijskih čelika Č.1531, Č.4731, Č.5432, te iz dobivenih rezultata određivanje optimalnih parametara.

U teorijskom dijelu dan je kratak pregled na strukturu i svojstva konstrukcijskih čelika, toplinsku obradu i metode ispitivanja.

Eksperimentalni dio obuhvatio je pripremu radnih komada, toplinsku obradu poboljšavanja, izradu uzoraka i izvođenje mehaničkih ispitivanja s analizom dobivenih rezultata.

Analizom rezultata dobivenih izvođenjem mehaničkih ispitivanja doneseni su zaključci o određivanju optimalnih parametara poboljšavanja konstrukcijskih čelika.

Ključne riječi:

Optimalni parametri poboljšavanja, ispitivanje mehaničkih svojstava, Č.1531, Č.4732, Č.5431

SUMMARY

This thesis studies the influence of tempering on the performance of carbon steel Č.1531, and alloy steels Č.4731, Č.5432, and determining the optimal parameters from obtained results.

The theoretical part gives a short overview of the structure and performance of steel, heat treatment and test methods.

The experimental part includes the preparation of test samples (heat treatment - tempering and metalworking operations), testing of the mechanical properties and finally analyzing the results.

By analyzing the results obtained from mechanical tests, optimal steel tempering parameters were determined.

Key words:

Optimal parameters of metal tempering, testing of mechanical properties, Č.1531, Č.4731, Č.5432

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆA SVOJSTVA ČELIKA.....	3
2.1. Fazne pretvorbe u čeliku.....	4
2.2. Djelovanje primjesa.....	6
2.3. Djelovanje nemetalnih uključaka.....	8
2.4. Djelovanje legirnih elemenata.....	8
3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI.....	11
3.1. Čelici za poboljšavanje.....	13
4. TOPLINSKA OBRADA.....	21
4.1. Poboljšavanje čelika.....	22
5. ISPITIVANJE MEHANISKIH SVOJSTAVA.....	25
5.1. Statičko vlačno ispitivanje.....	26
5.2. Ispitivanje udarnog rada loma metoda Charpy.....	29
5.3. Ispitivanje tvrdoće.....	30
5.3.1. Metoda po Brinell – u.....	30
5.3.2. Metoda po Vickersu.....	31
5.3.3. Metoda po Rockwell – u.....	33
5.4. Metalografija.....	34
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	35
6.1. Analiza materijala prije toplinske obrade.....	37
6.2. Preporučene vrijednosti.....	39
7. ANALIZA REZULTATA.....	40
8. ZAKLJUČAK.....	43
9. LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Opća podjela čelika prema namjeni.....	3
Slika 2.1.1. Dijagram stanja Fe_3C	4
Slika 2.4.1. Sulfid MnS u čeliku sa 0,35%C.....	10
Slika 3.1.1. Visokopopušteni martenzit u mikrostrukturi poboljšanog čelika.....	13
Slika 3.1.2. Ovisnost mehaničkih svojstava o dimenzijama.....	15
Slika 3.1.3. Jominy krivulja čelika Č.1530 i Č.4732.....	15
Slika 3.1.4. Ovisnost mehaničkih svojstava o temp. popuštanja.....	16
Slika 3.1.5. Utjecaj mikrostrukture nakon gašenja i promjera čelika na vlačnu čvrstoću i udarnu radnju loma Č.4830.....	16
Slika 3.1.6. Jominy krivulje prokaljivosti čelika.....	17
Slika 3.1.7. Usporedba tvrdoće površinskog sloja toplinskim obradama.....	19
Slika 3.1.8. Shematski prikaz flokula.....	19
Slika 3.1.9. Dijagram žarenja velikih otkovaka.....	20
Slika 4.1. Konstrukcija TTT – dijagrama.....	21
Slika 4.1.1. Dijagram postupaka toplinske obrade poboljšavanja.....	22
Slika 4.1.2. Dijagram naprezanje – istezanje za pojedina stanja postupkom poboljšavanja.....	23
Slika 4.1.3. Kvalitativni dijagram poboljšavanja čelika.....	24
Slika 5.1. Vrste i djelovanje opterećenja.....	25
Slika 5.2. Statičko i dinamičko djelovanje opterećenja.....	26
Slika 5.1.1. Dijagram sila – produljenje.....	26
Slika 5.1.2. Dijagram naprezanje – istezanje za meki čelik.....	27
Slika 5.1.3. Dijagrami naprezanje – istezanje za neke metalne materijale.....	28
Slika 5.2.1. Shema Charpyevog bata.....	29
Slika 5.2.2. Dimenzije epruveta za ispitivanje sa „U“ utorom.....	29
Slika 5.3.1.1. Ispitivanje po Brinell metodi.....	31
Slika 5.3.2.1. Prikaz ispitivanja po Vickers metodi.....	32
Slika 5.3.3.1. Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće po HRC metodi.....	33

Slika 6.1. Radno mjesto kidalica Otto Worpert Werke U60.....	36
Slika 6.2. Radno mjesto Charpyevog bata.....	36
Slika 6.1.1. Pokidane epruvete prije toplinske obrade.....	37
Slika 6.1.2. Pripremljeni uzorci za metalografiju.....	37
Slika 6.1.3. Dijagrami sila – produljenje Č.1531, Č.4731, Č.5432 dobiven kidanjem prije toplinske obrade.....	39
Slika 6.2.1. Dijagram vrijednosti utjecaja temp popuštanja na mehanička svojstva Č. 1531...	39
Slika 6.2.1. Dijagram vrijednosti utjecaja temp popuštanja na mehanička svojstva Č. 4731...	40
Slika 6.2.1. Dijagram vrijednosti utjecaja temp popuštanja na mehanička svojstva Č. 5432...	41
Slika 7.1. Dijagram temperature visokog popuštanja i dobivenih vrijednosti vlačne čvrstoće Č.1531.....	43
Slika 7.2. Dijagram temperature visokog popuštanja i dobivenih vrijednosti vlačne čvrstoće Č.4731.....	44
Slika 7.3. Dijagram temperature visokog popuštanja i dobivenih vrijednosti vlačne čvrstoće Č.1531.....	45
Slika 7.4. Pokidane epruvete poslije toplinske obrade.....	46
Slika 7.5. Pokidane epruvete na Charpy – evom batu.....	47
Slika 7.6. Dijagrami sila – produljenje nakon poboljšavanja.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 2.1.1. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva.....	6
Tablica 2.4.1. Granični maseni udjeli elemenata (EN 10020).....	8
Tablica 3.1. Opća podjela konstrukcijskih čelika prema kemijskom sastavu.....	11
Tablica 3.1.1. Kemijski sastav i parametri toplinske obrade.....	14
Tablica 3.1.2. Čelici za poboljšavanje.....	18
Tablica 3.1.3. Čelici za velike otkovke.....	19
Tablica 6.1. Plan pokusa sa parametrima poboljšavanja.....	35
Tablica 6.2. Plan pokusa sa temperaturama visokog popuštanja.....	35
Tablica 6.1.1. Mehanička svojstva materijala.....	38
Tablica 6.1.2. Kemijski sastav materijala.....	38
Tablica 7.1. Mehanička svojstva nakon toplinske obrade poboljšavanja.....	40
Tablica 7.2. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma (žilavosti).....	46
Tablica 7.3. Rezultati ispitivanja po Brinell - u.....	47

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

CRTEŽ BROJ 1

Epruveta za statički vlačni pokus

1. Uvod

Povijest ljudskog roda, opstanak i napredak civilizacija usko su povezani s razvojem materijala. Temelj je otkrivanje, dobivanje, prerada i oblikovanje materijala u uporabe tvorevine. O tome ne samo da je ovisio život već i opstanaka obitelji, plemena a kasnije i većih zajednica (gradova i država). Najčešće korišteni materijali su bili lako dostupni i široko rasprostranjeni: drvo, kamen, kosti, koža, dlaka i drugi koji su dobivani izravno iz prirode a korišteni su kao oruđa i oružja. Upravo ti materijali koji su pretežno bili upotrebljavani u pojedinim epohama su obilježili čitave civilizacije. Po njima su i velika povijesna razdoblja dobila svoje ime: kameno doba, bakreno doba, brončano doba, željezno doba. Vremenom su se materijali za izradu oružja i oruđa, a potom i raznovrsnih naprava te konačno i strojeva sve više usavršavali.

Sam tijek i složenost izbora materijala određen je prvenstveno vrstom i tipom proizvoda (razina zahtjeva funkcionalnosti, nosivosti, trajnosti, pouzdanosti, cijene i dr.). Ekstremni uvjeti rada uvjetuju i visoke zahtjeve na svojstva materijala. Za niz već izvedenih konstrukcija materijal je propisan, poznat i provjeren, a kasnije se samo analiziraju mogućnosti zamjene ili primjene materijala boljih svojstava. Najveća sloboda i kreativnost biranja prisutna je kod konstruiranja i razrade novih konstrukcija gdje su složeni zahtjevi, a ne postoje iskustva o primjeni materijala.

Osnovni cilj pri odabiru materijala za metalne konstrukcije je da materijal bude što jeftiniji, a da pri tom zadovolji tražena mehanička svojstva.

Izbor materijala je usko povezan s projektiranjem i konstruiranjem dijelova i izborom te razradom postupaka proizvodnje i montaže. Provodi se ponajprije pri konstruiranju proizvoda, a rijeđe tijekom izrade ili nabave. U konstrukcijskom dijelu donose se odluke koje utječu na oko 70% troškova proizvoda.

Toplinska obrada provodi se sa ciljem vraćanja osnovnih ili postizanja boljih svojstava metala. Izbor vrste i režima toplinske obrade ovisi o vrsti materijala i potrebnih svojstava.

Materija je izložena u 9 poglavlja:

1. Uvod
2. Opća svojstva čelika
3. Konstrukcijski čelici
4. Toplinska obrada
5. Ispitivanje mehaničkih svojstava
6. Eksperimentalni dio
7. Analiza rezultata
8. Zaključak
9. Literatura

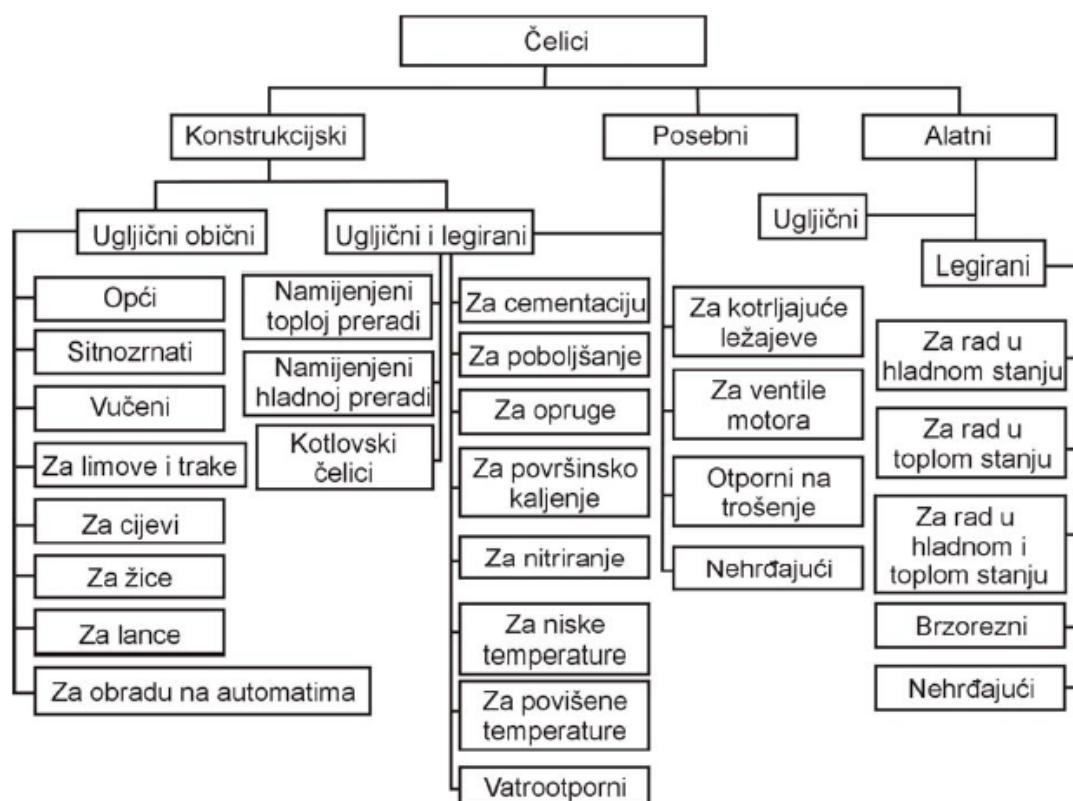
Nakon uvoda, u drugom poglavlju dan je kratak pregleda općih svojstava čelika bitnih za određivanje prikladnog materijala. U trećem poglavlju opisani su konstrukcijski čelici te posebno konstrukcijski čelici (Č.1531, Č.4732, Č.5432) koji su predmetom ispitivanja.

Četvrto poglavlje daje teorijski pregled nad provedenom toplinskom obradom. U petom djelu je objašnjenje ispitivanja mehaničkih svojstava čelika sa pregledom metoda ispitivanja. Eksperimentalni dio se sastoji od dobivenih mehaničkih svojstava ispitivanjem epruveta prije toplinske obrade i preporučenih vrijednosti iz literature. Sedmi dio se sastoji od rezultata ispitivanja dobivenih nakon provedene toplinske obrade. Osmi dio je analiza rezultata i određivanje optimalnih parametara poboljšavanja. U privitku se nalazi završni rad na CD-u te sastavnica sa dimenzijama vlačne epruvete. U literaturi su navedeni materijali koji su korišteni za objašnjavanje teorijskog djela.

2. Opća svojstva čelika

Postoji nekoliko definicija čelika koje se mogu pronaći u različitim literaturama. Europske norme definiraju čelik kao željezni materijal pogodan za toplu preradu. Čelik se može definirati i kao metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($\leq 2\%C$) uz pristune pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostali) sa ili bez dodataka ostalih legirajućih elemenata. Svi ti elementi utječu na konačna svojstva proizvoda, neki su korisni u poželjni, a neki su štetni i nepoželjni.

Nakon što smo podesili sastav, lijevamo taljevinu u kalupe (kokile) i oblikujemo ih postupcima deformiranja (valjanje, prešanje, kovanje) u željeni oblik poluproizvoda (limovi, šipke, trake i sl.).



Slika 2.1. Opća podjela čelika prema namjeni [4]

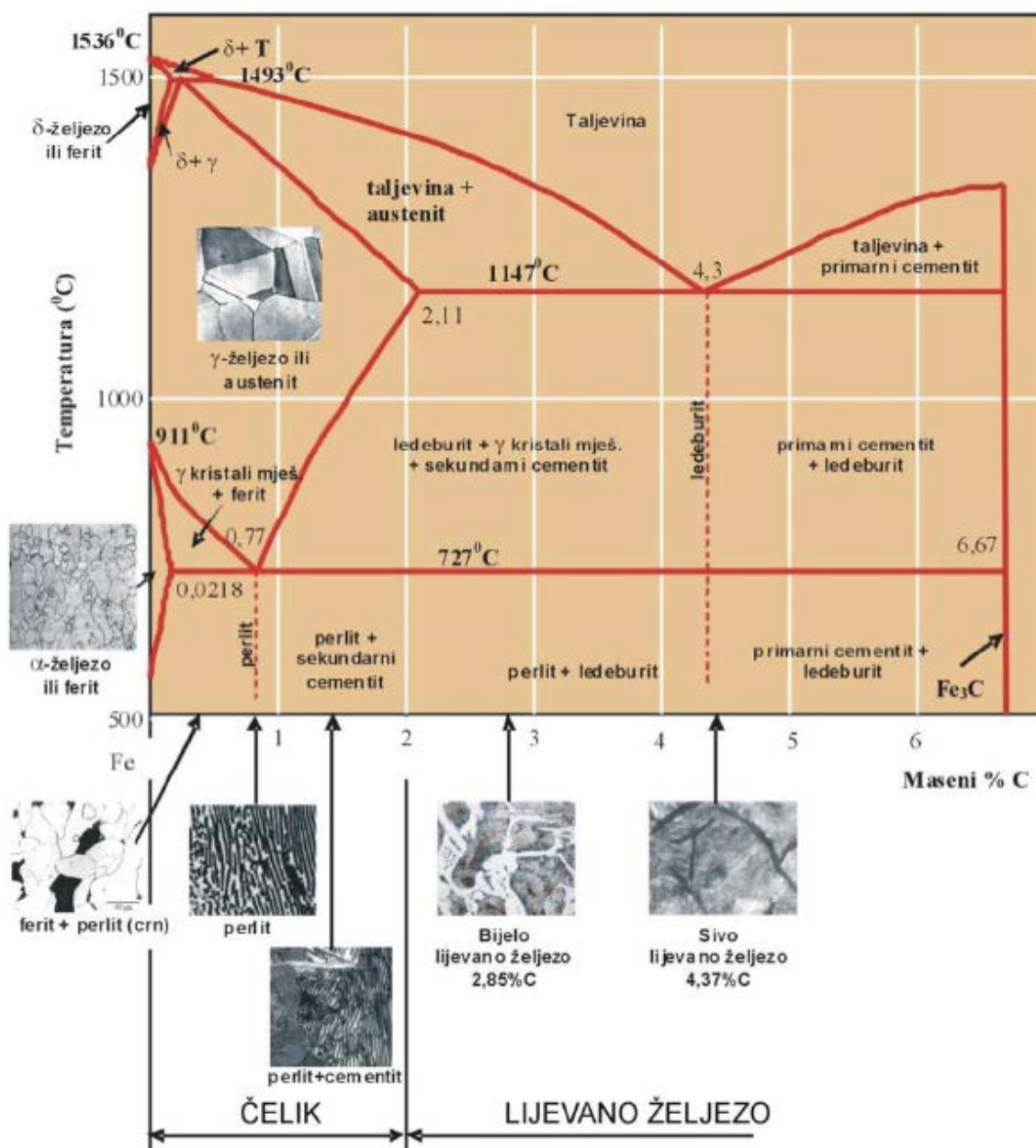
Temeljna svojstva čelika određujemo kemijskim sastavom, mikrostrukturom i stanjem te oblikom i dimenzijama proizvoda.

Kemijski sastav na svojstva utječe masenim udjelom ugljika, masenim udjelom pratilaca i nečistoća (Mn, Si, P, S, Al i drugi) i vrstama i udjelom legiranih elemenata (za posebna svojstva). Ugljik svojim udjelom utječe na mikrostrukturu čelika a time i na njegova svojstva. Porastom ili smanjenjem ugljika utječemo na tvrdoću, granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, istezljivost i udarni rad loma. Ugljikom isto tako utječemo i na obradu, porastom raste zakaljivost, a opada sposobnost za plastičnu deformaciju i zavarljivost.

Mikrostruktura i stanje utječe određenim sastavom i prethodnim postupcima oblikovanja i toplinske obrade. Neke veće dimezije presjeka daju manja mehanička svojstva, a neke manje dimezije presjeka daju bolja mehanička svojstva.

2.1 Fazne pretvorbe u čeliku

Legure Fe – C kristaliziraju se prema dijagramu stanja željezo – ugljik koji je jedan od najvažnijih dijagrama u tehničkoj praksi. Prema tom dijagramu određujemo peritektički, eutektički i eutektoidni dio, a svaki od njih nam daje neka svoja svojstva. Svaki taj dio ovisi o sastavu i temperaturi jer prema tome atomi ugljika ulaze u rešetku željeza tvoreći tako intersticijske kristale mješance (α , γ , δ) ili kristale grafita. U mikrostrukтури čelika tako nalazimo sljedeće faze i konstituente: ferit, austenit, cementit, perlit, ledeburit, bainit, martenzit prikazane na slici 2.1.1.



Slika 2.1.1. Dijagram stanja Fe₃C [4]

δ – ferit predstavlja krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza i nemagnetičan je. Javlja se nakon skrućivanja pri $\approx 1456^\circ\text{C}$ uz 0,09% ugljika.

Austenit (γ – Fe) predstavlja intersticijski krutu otopinu ugljika u površinski centriranoj kubičnoj rešetci (FCC) željeza. Specifičan je jer ima najmanji specifični volume i vrlo je žilav. Javlja se pri $\approx 1147^{\circ}\text{C}$ uz 2,06% ugljika.

α – ferit predstavlja intersticijsku krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza. To je najmekša faza u dijagramu a javlja se pri $\approx 723^{\circ}\text{C}$ uz 0,025% ugljika.

Cementit predstavlja metastabilni intersticijski spoj. Sadrži 6,67% ugljika a specifičan je jer je tvrd i krhak željezni karbid koji doprinosi porastu tvrdoće čelika ako je pravilno rasprostranjen.

Perlit predstavlja eutektoidnu smjesu ferita i cementita koja nastaje pri $\approx 723^{\circ}\text{C}$ uz 0,8% ugljika vrlo polaganim hlađenjem. Osnova mu je bijeli ferit (u većini) i tanke pločice cementita.

Ledeburit predstavlja eutektičnu mješavinu austenita i cementita koja nastaje pri $\approx 1147^{\circ}\text{C}$ uz 4,3% ugljika.

Bainit predstavlja međustrukturu sastavljenu od ferita i cementita ali za razliku od perlita, stvaraju se samo lamele ferita na čijim se granicama izdvaja cementit u obliku sitnih kuglastih čestica. Da bi postigli ovu strukturu potrebno je čelik hladiti brzinom između temperature stvaranja perlita i martenzita.

Martenzit predstavlja prezasićenu krutu otopinu ugljika u volumno centriranoj tetragonalnoj rešetci (BCT). Javlja se u obliku nakupina igličastih kristala koji se sijeku pod određenim kutovima, a nastaje kada čelik austenitne mikrostrukture ohladimo na dovoljno nisku temperaturu. Specifičan je po nestabilnosti, tvrdoći i krhkosti, a daje nam veliku tvrdoću kaljenja.

Kao što vidimo iz prikazanog, najvažnije reakcije čelika odnose se na transformaciju iz austenitnog područja pri različitim brzinama hlađenja. Hlađenje se može provoditi na zraku, u solnoj kupci, u peći i sl. Različiti načini hlađenja daju nam različite brzine hlađenja. Vrlo polagano hlađenje može se predvidjeti prema faznom dijagramu. Za veće brzine hlađenja ovaj dijagram nam nije dostatan da bi pretpostavili fazne transformacije i mikrostrukturu zato jer se većim brzinama nedaje dovoljno vremena za završetak procesa difuzije (čest slučaj u proizvodnji) i u tom slučaju se mikrostruktura može razlikovati od one koju daje ravnotežni dijagram stanja.

Sporo hlađenje eutektoidnog čelika (0,8% C) karakterizira austenitna mikrostruktura na temperaturi iznad 723°C . Kod te temperature dolazi do reakcije i nastaje perlitna mikrostruktura, a tu vidimo lamele ferita kojese deblje od lamela cementita.

Sporo hlađenje podeutektoidnog čelika (0,4%C) na temperaturi iznad 800°C ima austenitnu mikrostrukturu, a na malo iznad 723°C sastoji se od ferita i austenita. Na temperaturi ispod 723°C austenit se raspada u perlit i sad se mikrostruktura sastoji od ferita i perlita. Ovo nam je jako bitno jer se bržim hlađenjem ferit stvara u obliku iglica ili pločica, a ne više kao oblik austenita.

Sporim hlađenjem nadeutektoidnog čelika (1,2%C) na temperaturi iznad 840°C čelik ima austenitnu mikrostrukturu. Na temperaturi malo iznad 723°C mikrostruktura se sastoji od austenita i sekundarnog cementita, koji se izlučuje na granicama austenitnog zrna. Na

temperaturi ispod 723°C austenit se raspada u perlit, pa se mikrostruktura sastoji od perlita i cementita.

2.2 Djelovanje primjesa

Prisutni primjesi (tzv. nečistoće i pratioci) odlučujući su za kvalitetu čelika. Ti primjesi kao npr. O, N, H, P, S te nemetalni uključci sulfidnog, oksidnog ili silikatnog tipa utječu na različita svojstva čelika.

U čeliku se javljaju kao elementi pratioci, skriveni i slučajni elementi i prisutne su u svakom čeliku. Naš cilj je njihove masene udjele svesti na što manju moguću mjeru.

Fosfor

Fosfor je nepoželjna primjesa i njegov maseni udio treba svesti na što nižu razinu (ispod 0,06%). U čeliku čini sa željezom supstitucijski kristal mješanac i tijekom skrućivanja dovodi do pojave primarnih segregacija zbog male brzine difuzije. Segregacije predstavljaju štetnu nehomogenost strukture. Izrazito spora difuzija uzrokuje nemogućnost njegove jednolike raspodjele i nakon prolaska intervala skrućivanja primarni dendritni kristali siromašni su fosforom i legirnim elementima, a ostatak taline sadrži fosfor i glavninu nemetalnih uključaka. Toplim oblikovanjem se dendritna lijevana mikrostruktura trakasto izdužuje (tzv. primarna trakavost) i vrlo se teško otklanja.

Povišenjem masenog udjela fosfora uzrokuje pojavu krhkosti u hladnom stanju tablica 2.2.1. Krhkost je izraženija i kad je prisutan viši sadržaja ugljika i kad je viša temperatura austenitizacije.

U iznimnim slučajevima se nekim čelicima povisuje maseni udio fosfora zbog poboljšanja rezljivosti (npr. čelici za obradu na automatima) ili da bi povisili granicu razvlačenja efektom percipacije kod korozijski postojanih čelika.

Tablica 2.1.1. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika.[4]

Sadržaj fosfora, %	Granica razvlačenja, N/mm^2	Vlačna čvrstoća, N/mm^2	Tvrdoća, HB	Kontrakcija, %	Žilavost, J/cm^2
0	280	340	1000	30	340
0,2	360	410	1250	30	200
0,4	440	480	1550	25	0

Kisik

Često nalazimo povišen maseni udio kisika kod niskougljičnih čelika kod kojih to izaziva pojavu oksida željeza (FeO). Ti oksidi, kao i sulfidi FeS , uzrokuju pojavu „crveni lom“. Da bi spriječili nastanak te pojave uklanjamo kisik iz taline dezoksidacijom čelika pri čemu nastaju oksidi Al_2O_3 i SiO_2 koji su tvrdi i kuglastog oblika, a pri kasnijoj obradi mogu dovesti do problema. Prisutnost kisika u čelicima povisuje im krhkost.

Vodik

Vodik pripada skupini elemenata s najmanjim promjerom atoma i stoga ima brzinu difuzije u željezu vrlo visoku, a čak je viša i od brzine difuzije ugljika. Vodik nam je jako štetan jer snižava žilavost i pri tome ne povećava čvrstoći ni granicu razvlačenja, a i teško se dokazuje njegova prisutnost u mikrostrukturi. Prelazi iz atomarnog stanja u molekularni u obliku sitnih mjehurića i to se naziva „vodikova krhkost“, a to znači da razugljičuje površinu i razara stabilne karbide i metalne veze između kristalnih zrna.

Dušik

Dušik je praktički netopljiv u rešetki željeza, ali brzim hlađenjem ostaje zarobljen u rešetki i potrebno ga je izvući iz rešetke. Izvlačenje se provodi dodavanjem elemenata (Al, Ti, Nb..) koji imaju veći afinitet prema dušiku od željeza i nastaju nitridi. Ne provedemo li izvlačenje, dolazi do pojave „starenja“ čiji je rezultat povišena čvrstoća a smanjena žilavost.

Maseni udio mu je od 0,01% - 0,03% te povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali smanjuje deformabilnost i udarni rad loma. Masenim udjelom dušika mjerimo kvalitetu čelika.

Sumpor

Sumpor dolazi iz rude i produkata izgaranja (SO_2), a u čelicima ga uvijek ostaje od 0,05 – 0,06%. Odgovoran je za pojavu segregacija jer sa željezom tvori nepoželjni sulfid FeS koji uzrokuje pojave „crvenog“ i „bijelog“ loma. Crveni lom se javlja pri temperaturama iznad 1000°C jer se FeS rastavlja pri 985°C , a dovodi do osjetnog smanjenja žilavosti. Zbog toga se čelici sa višim sadržajem sumpora u pravilu ne deformiraju u toplom stanju. Takav štetan utjecaj se uklanja dodavanjem mangana koji tvori sulfid MnS i ima znatno višu temperaturu taljenja (1610°C) i koji se dobro plastično oblikuje na hladno i toplo.

Može se i namjerno dodavati (do 0,3%) u slučaju čelika namijenjenih obradi odvajanjem čestica jer snižava trenje između obratka i alatne oštrice te pospješuje lakše lomljenje strugotine.

2.3 Djelovanje nemetalnih uključaka

Prisutnost nemetalnih uključaka određuje daljnja svojstva oblikovljivosti i otpornosti na lom. Uključci mogu biti oksidne, sulfidne ili silikatne vrste i najčešće se radi o kristalima mješancima ili eutekticima, a njihovo je utvrđivanje otežano. Rijeđe ih se pronalazi kao čisti kemijski spojevi tipa MnO, MnS ili SiO₂. Prema obliku se dijele na okrugle, poligonalne i tvrde. Poligonalni su često tvrdi, a izduženi su često oblikovljivi. Svojom količinom, vrstom i raspodjelom u čeliku ovise o tvrdoći ili krhkosti, smanjuju žilavost i dovode do anizotropnosti svojstava čvrstoće. Pri djelovanju vanjskog opterećenja, u njihovoj blizini dolazi do koncentracije naprezanja te se odvajaju fazne granice matice-uključci. Otklanjamo ih dodavanjem Zr, Ce ili Ti čeliku.

2.4 Djelovanje legirnih elemenata

Čelik u širokom opsegu mijenja svoja svojstva dodavanjem drugih elemenata – legiranjem. Da bi čelik se nazivao legirni mora sadržavati jedan ili više legirnih elemenata sa određenim masenim udjelima - tablica 2.4.1. Najčešći legirni elementi su krom, nikal, mangan, silici, volfram, vanadij, molibden, titan, aluminij, kobalt i mnogi drugi. Pojavljuju se u različitim oblicima kao spojevi sa nemetalnim uključcima, kao spojevi sa željezom ili međusobni (karbidi..) ili se rastvarju u BCC ili u FCC rešetci. Legiranje se provodi u svrhu dobivanja traženog svojstva ili kombinacija svojstava - npr. mehanička svojstva, otpornost na koroziju, na trošenje, prokaljivost i dr. Legirane čelike dijelimo na niskolegiranje (do 5% udjela legirnog elementa) i na visokolegirane (preko 5% udjela legirnog elementa).

Tablica 2.4.1. Granični maseni udjeli elemenata (EN 10020) [2]

Element	Granična vrijednost (mas. %)	ISO 4948/1	HRN C.B0.002
Al	0,30	0,10	0,10
B	0,0008	0,0008	
Bi	0,10	0,10	0,10
Co	0,30	0,10	0,10
Cr	0,30	0,30	0,30
Cu	0,40	0,40	0,40
La (lantanidi)	0,10	0,05	
Mn	1,65 ^{a)}	1,65	0,80 (1,80)
Mo	0,08	0,08	0,08
Nb	0,06	0,06	
Ni	0,30	0,30	0,30
Pb	0,40	0,40	
Se	0,10	0,10	
Si	0,60	0,60	0,60
Te	0,10		
Ti	0,05	0,05	0,05
V	0,10	0,10	0,01
W	0,30	0,10	0,10
Zr	0,05	0,05	
ostali (osim C, P, S i N)	0,10		

a) Ako je utvrđen samo najveći udjel mangana, granična je vrijednost 1,80% i ne primjenjuje se pravilo 70%.

Ugljik

Ugljik je sastavni dio čelika i ne smatra se legirajućim elementom kao takvim, ali ima najveći utjecaj na svojstva čelika. Ugljikom se određuje čvrstoća i granica razvlačenja, a smanjuje se duktilnost i žilavost. Bitna odrednica ugljika je osiguravanje zakaljivosti i prokaljivosti nelegiranih i legiranih čelika. Zakaljivost je mogućnost kaljenja čelika, a prokaljivost je dubina zakaljenog sloja. Jako prokaljiv legirani čelik može se zakaliti i na debljim presjecim dok kod samo ugljičnih čelika je do debljine 16 mm.

Aluminij

Najčešće se koristi kao sredstvo za deoksidaciju i njime čelik postaje manje osjetljiv na starenje (vezanjem za dušik) te pospješuje stvaranje sitnijih zrna. Zahvaljujući svojem svojstvu stvaranja nitrida, predstavlja važan legirni element za stvaranje nitriranja (spoj AlN). Isto tako reagira sa niklom ili titanom stvarajući intermetalne spojeve (Ni_3Al i Ni_3Ti). Bitno je naglasiti da ne doprinosi poboljšavanju mehaničkih svojstava čelika, ali jako sužava austenitno područje.

Krom

Krom je jedan od značajnijih legirnih lemenata jer ima afinitet prema ugljiku i zbog toga lako stvara karbide (jak je karbidotvorac). Često se dodaje čelicima za izradu reznih alata jer karbidi povišuju otpornost na pritisak i na abrazijsko trošenje, čime se povećava izdržljivost i trajnost oštrice alata. Budući da povišuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita (M_s), krom omogućava da se nakon austenitiziranja čelici hlade u ulju ili čak na zraku. Udarni rad loma je manji nego kod ostalih čelika i utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja, ali to se izbjegava legiranjem sa molibdenom.

Molibden

Ovaj element najčešće dolazi u kombinaciji sa drugim legirnim elementima i povećava prokaljivost i čvrstoću čelika, a sprječava pojavu visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Utječe na povišenje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i granice puzanja. Jak je karbidotvorac čime utječe na sitnozmatost čelika te tako utječe na poboljšanje reznih karakteristika brzoreznih čelika.

Nikal

Ima vrlo slabi afinitet prema ugljiku i ne stvara karbide, ali je izrazito gamageni element i proširuje područje austenita. Njime možemo povišiti žilavost kao i korozijsku postojanost, a smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. U pravilu se gotovo uvijek legira u kombinaciji s nekim drugim legirnim elementom zbog visoke cijene.

Silicij

Često se koristi kao sredstvo za dezoksidaciju, te povišuje čvrstoću, otpornost prema trošenju i granicu razvlačenja. Koristi se u čelicima za opruge jer povišuje granicu elastičnosti i dinamičku izdržljivost.

Titan

Ima izražen afinitet prema kisiku, dušiku, sumporu i ugljiku, djelovanje mu je izrazito deoksidirajuće, denitrirajuće i desulfirajuće. Najjači je karbidotvorac jer stvara vrlo stabilan karbid TiC , a ti se karbidi teško raspadaju pri povišenim temperaturama. Djeluje na snižavanje austenitnog područja, a u većim udjelima može djelovati na precipitacijsko očvršćavanje stvaranjem intermetalnih spojeva (Ni_3Ti).

Vanadij

Izrazito je jak karbidotvorac i nitridotvorac (iznad 0,4%) i na taj način povisuje tvrdoću i otpornost na trošenje stvaranjem stabilnog karbida VC ili V_4C_3 . Ta sposobnost iskorištena u brzoreznim čelicima te alatnim i konstrukcijskim čelicima namijenjenih za rad pri povišenim temperaturama.

Volfram

Isto pripada skupini karbidotvoraca i tvori vrlo tvrde i toplinski postojane karbide. Sprječava rast zrna pri povišenim temperaturama i povisuje žilavost čelika. Povisuje granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću.

Mangan

Najčešće se koristi kao deoksidator i desulfizator i stvara sulfid MnS čime sprječava negativno djelovanje sulfida FeS . Legiranje sa manganom povećava se prokaljivost čelika, a u nezakaljenim čelicima poboljšava se čvrstoća i žilavost. Dodavanjem svakih 1% mangana može dovesti do povišenja granice razvlačenja konstrukcijskih čelika za oko $100 N/mm^2$. Čelicima se proširuje područje austenita ukoliko je sadržaj mangana veći od 12%, tako pri normalnoj temperaturi imamo austenitnu mikrostrukturu.



Slika 2.4.1. Sulfid MnS u čeliku sa 0,35%C [4]

3. Konstrukcijski čelici

Koriste se kod izrade konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju, ali i za nosive i građevinske konstrukcije. Prenose sile, gibanja (momente), zatvaraju, spajaju elemente konstrukcija i dr. Najčešće su to osovine, vratila, zupčanici, opruge, vijci, poklopci, razni nosači, ventili, kućišta i dr. Obzirom na vrstu i količinu uloga koje odrađuju, od njih se traže razna mehanička svojstva. Moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (da bi izbjegli pojavu krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Osim toga, moraju imati otpornost na trošenje (što manji gubitak mase) i na koroziju (korozijska postojanost u atmosferi ili u agresivnim tekućinama) te tehnološka svojstva (obradivi odvajanjem čestica, zavarljivi, sklonost hladnom oblikovanju i sl.).

Konstrukcijske čelike možemo podijeliti na ugljične (nelegirane) i legirane – tablica 3.1. Konstrukcijski čelici koji sadrže manje od 0,60%C primijenjujemo za izradu strojeva i uređaja koji se koriste u neagresivnim sredinama pri temperaturama od -25 do 300°C.

Tablica 3.1. Opća podjela konstrukcijskih čelika prema kemijskom sastavu [4]

UGLJIČNI (NELEGIRANI) ČELICI	
Opće namjene	Posebne namjene
• obična kvaliteta • kvalitetni čelici	• za građevinarstvo • za brodogradnju i željeznice • za kotlove i posude pod tlakom • za karoserijske limove • za cijevi, žice, zakivke • za zavarene lance • čelici za automate • za elektrotehniku

LEGIRANI ČELICI	
Opće namjene	Posebne namjene
• za poboljšanje • za površinsko kaljenje • za cementaciju • za nitriranje	• za opruge • za kotrljajuće ležajeve • za rad pri niskim temperaturama • za ventile • čelici povišene čvrstoće ($R_{p0.2} > 360$ Mpa) (mikrolegirani)

- Ugljični (nelegirani) konstrukcijski čelici

Svrstavamo ih prema mehaničkim svojstvima, a koristimo ih za slabije opterećene dijelove, za šipke, rešetke i dr. Primijenjuju se u sirovom stanju (bez toplinskih obrada) i obične su kvalitete.

Srednje ugljični čelici (0,25 – 0,60%C) koristimo u normaliziranom stanju ili u poboljšanom stanju za dijelove manjih presjeka, a primijenjuje se i za dijelove otporne na trošenje (zupčanici, ekscentri, klinovi...).

Čelici za građevinarstvo su niskougljični čelici (<0,25%C) i u obliku profila, limova, šipki, žica.

Čelici za brodogradnju su od niskougljičnog čelika i u obliku limova i profila, a bitno je da su zavarljivi i služe za izradu brodskog trupa. Za željeznice se koriste u obliku posebnih valjanih proizvoda i otkovaka (kotači, tračnice, vagoni).

Karoserijski čelici su čelici visoke čistoće (P i S manje od 0,035%) i imaju glatku površinu, a dobro se izvlače.

Čelici za žice služe za izradu žica za razne namjene (žičane mreže i opruge, kišobrani, sajle i kotači), imaju od 0,3 do 1 % ugljika.

Čelici za automate koristimo za izradu sitnih dijelova na automatskim strojevima u obliku su valjanih ili vučenih šipki. Imaju povećan sadržaj fosfora (do 0,11%), sumpora (do 0,03%) ili olova (do 0,35%) te im oni daju lako lomljivu isprekidanu strugotinu.

- Legirani konstrukcijski čelici

Legirani konstrukcijski čelici imaju u svom sastavu osim ugljika (0,25 - 0,60 %) još i jedan ili više legiranih elemenata od kojih svaki pridonosi ili daje određena svojstva. Prema tim legiranim elementima ih još i nazivama, pa tako mogu biti :

- manganski (1,20 – 1,60% Mn) i koristimo ih za osovine, vratila, za veće zupčanike,
- kromovi (1 – 1,5 % CrSi) za jako opterećena koljenasta vratila, zupčanike,
- krom – molibdenski (1% Cr i 0,2% Mo) za sitnije žilave dijelove,
- krom – niklovi (0,6 – 1,5 %Cr i 1 – 3,5 % Ni) za zupčanike mjenjača, dijelove turbina.

Kromovi čelici se koriste za bregaste osovine, vretena ili druge dijelove izložene trošenju. Tako koristimo krom – niklove i krom – manganske čelike za izradu zupčanika mjenjača ili diferencijala, a krom – molibdenski čelici za bregaste osovine, kardanske zglobove i dr.

Čelici za opruge trebaju imati visoku granicu razvlačenja, dobru istezljivost i dinamičku izdržljivost, a posebno kod nekih se traži i visoka otpornost na koroziju i povišene temperature. Poboljšavamo ih dodavanjem silicija (0,15 – 1,8%) za elastičnost te sa manganom (1%) i kromom (1%) za prokaljivost.

Čelici za kotrljajuće ležajeve trebaju imati veliku tvrdoću i otpornost na trošenje. Potrebna je dobra prokaljivost te obradivost rezanjem i deformiranjem. Imaju visok sadržaj ugljika i kroma (1%C i 0,5 – 1,5%Cr).

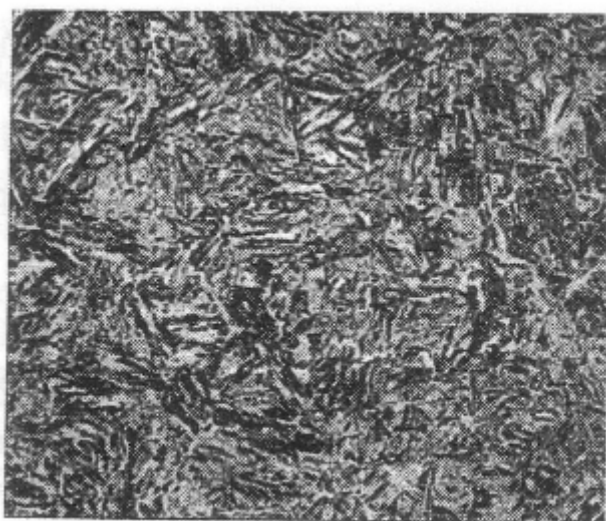
Čelici za rad pri niskim temperaturama su legirani sa niklom uz nizak sadržaj ugljika (0,1 – 0,15%). temperatura prelaska u krhko stanje je pri 3 – 5% Ni oko -100°C , a pri 8 – 10% Ni oko -200°C . Uglavnom služe za izradu transportnih ili stacionarnih rezervara za suhi led ili tekući metan. Za još niže temperature legiramo ih sa CrNi ili CrMnNiN.

Čelici za ventile motora moraju biti vatrootporni i zadržavati dobra mehanička svojstva pri visokim temperaturama (oko 900°C). Najčešće se legiraju sa silicijem (1, 5 – 3,2 %), kromom (9 – 17%), a može i niklom, molibdenom i vanadijem za najopterećenije dijelove.

Čelici povišene čvrstoće koriste tehnologiju mikrolegiranja. Mikrolegiranje se provodi kod običnih ugljičnih čelika sa minimalnim (do 0,5%) dodacima legiranih elemenata. Time se povećava granica razvlačenja, čvrstoće i tvrdoća, ali se smanjuje masa konstrukcije.

3.1. Čelici za poboljšavanje

Čelici za poboljšavanje su moja tema rada i to Č.1531, Č.4732, Č.5432. Ovi čelici pripadaju skupini nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika. Svoje odgovarajuća svojstva (granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i žilavost) postižu kaljenjem i visokim popuštanjem (iznad 500°C). Ova skupina čelika sadrži 0,25 – 0,60% ugljika, a kaljenjem se nastoji postići što potpunija martenzitna mikrostruktura, po presjeku (što viša prokaljenost) slika 3.1.1., a naknadnim popuštanjem što veća žilavost. Primijenuju se za mehanički i naročito dinamički visoko opterećene dijelove strojeva i uređaja kao što su osovine, vratila, supčanici, poluge i sl.



Slika 3.1.1. Visokopopušteni martenzit u mikrostrukturi poboljšanog čelika (mjerilo 500:1)
[2]

Pri visokom popuštanju kaljenog čelika u mikrostrukturi se mijenjaju martenzit i donji bainit, ostali konstituenti ostaju nepromijenjeni, zaključujemo da se idealna jednolična svojstva preko cijelokupnog presjeka postižu samo potpunim prokaljivanjem. Tolerancije sastava su određene, a maseni udio nečistoća je jako nizak (P i S manje od 0,035%) – tablica 3.1.1. Potpuno prokaljivanje je gašenje cijelog presjeka nadkritičnim intenzitetom kako bi mikrostruktura bila potpuni martenzit. Takav način nam omogućuje maksimalno moguću udarnu radnju loma i jednoličnost mehaničkih svojstava.

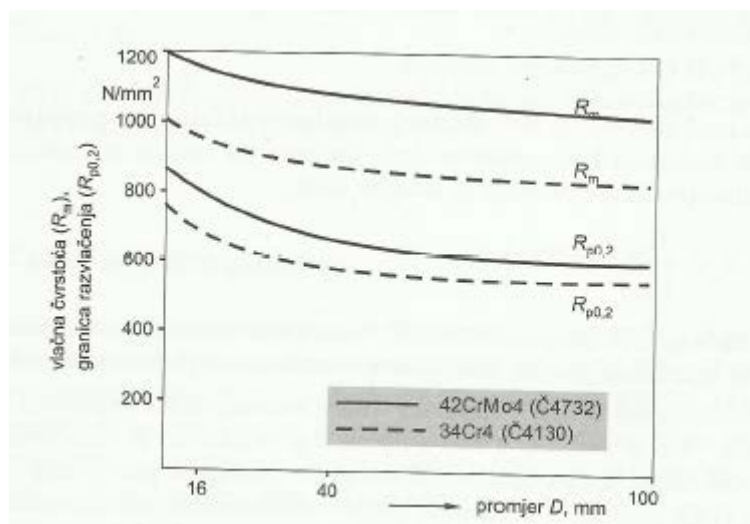
Tablica 3.1.1. Kemijski sastav i parametri toplinske obrade [1]

Oznaka čelika EN (stara HRN)	Kemijski sastav, maseni %									Kovanje °C	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Poboljšavanje		
	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	P % maks	S %				Kaljenje		Popuštanje °C
													u vodi	u ulju	
C22 (Č1330)	0,18- 0,25	0,15- 0,35	0,30- 0,60					0,045	maks 0,045	1100- 900	650-700	880-910	860- 890	870- 900	550 do 680
C45 (Č1530)	0,42- 0,50	0,15- 0,35	0,50- 0,80					0,045	maks 0,045	1100- 850	650-700	840-870	820- 850	830- 860	
C80 (Č1730)	0,57- 0,85	0,15- 0,35	0,60- 0,90					0,045	maks 0,045	1050- 850	650-700	820-850	800- 830	810- 840	
C22E (Č1331)	0,18- 0,25	0,15- 0,35	0,30- 0,60					0,035	maks 0,035	1100- 900	650-700	880-910	860- 890	870- 900	
C60E (Č1731)	0,57- 0,85	0,15- 0,35	0,60- 0,90					0,035	maks 0,035	1050- 850	650-700	820-850	800- 830	810- 840	
40Mn4 (Č3130)	0,36- 0,44	0,25- 0,50	0,80- 1,10					0,035	maks 0,035	1100- 850	650-700	850-880	820- 850	830- 860	
34Cr4 (Č4130)	0,30- 0,37	0,15- 0,40	0,60- 0,90	0,90- 1,20				0,035	maks 0,035	1050- 850	680-720	850-890	830- 860	840- 870	540 do 680
25CrMo4 (Č4730)	0,22- 0,29	0,15- 0,40	0,50- 0,80	0,90- 1,20		0,15- 0,30		0,035	maks 0,035	1050- 850	680-720	860-900	840- 870	850- 880	
42CrMo4 (Č4732)	0,38- 0,45	0,15- 0,40	0,50- 0,80	0,90- 1,20		0,15- 0,30		0,035	maks 0,035	1050- 850	680-720	840-880	820- 850	830- 860	
50CrMo4 (Č4733)	0,46- 0,54	0,15- 0,40	0,50- 0,80	0,90- 1,20		0,15- 0,30		0,035	maks 0,035	1050- 850	680-720	840-880	820- 850	830- 860	
30CrMoV9 (Č4734)	0,26- 0,34	0,15- 0,40	0,40- 0,70	2,30- 2,70		0,15- 0,25	0,10- 0,20	0,035	maks 0,035	1050- 850	680-720	860-900	840- 870	850- 880	
50CrV4 (Č4830)	0,47- 0,55	0,15- 0,40	0,70- 1,11	0,90- 1,20			0,10- 0,20	0,035	maks 0,035	1050- 850	680-720	840-880	820- 850	830- 860	
36CrNiMo4 (Č5430)	0,32- 0,40	0,15- 0,40	0,50- 0,80	0,90- 1,20	0,90- 1,20	0,15- 0,30		0,035	maks 0,035	1050- 850	650-700	850-880	820- 850	830- 860	
30CrNiMo8 (Č5432)	0,26- 0,33	0,15- 0,40	0,30- 0,60	1,80- 2,20	1,80- 2,20	0,30- 0,50		0,035	maks 0,035	1050- 850	650-700	850-880	-	830- 860	

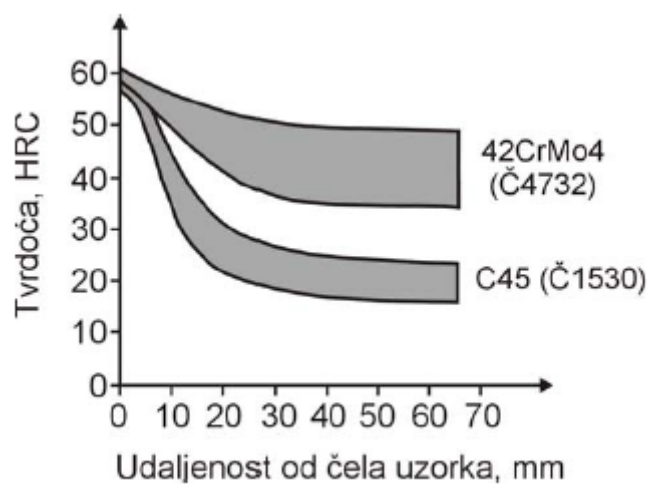
Na prokaljenost utječe prokaljivost čelika, dimenzije dijela – slika 3.1.2. i uvjeti gašenja, a prokaljivost se određuje iz omjera tvrdoće kaljenja na nekom presjeku ($H_{kaljeno}$) i maksimalno postizive tvrdoće za određeni čelik ($H_{maksimalno}$) i označave se kao stupanj zakaljenosti (S_k).

$$S_k = \frac{H_{kaljeno}}{H_{maksimalno}} = 0,72 - 1,00$$

Vrijednost stupnja zakaljenosti $S_k \cong 0,72$ odgovara približno 50% - tnoj martenzirnoj mikrostrukturi, a vrijednost $S_k \cong 1,00$ odgovara 100% - tnoj martenzitnoj mikrostrukturi. Na prokaljivost primarno utječu maseni udio ugljika i legirnih elemenata. Što je viši postotak ugljika i legirnih elemenata, to je i veća prokaljivost. Standardno se određuje čeonim gašenjem Jominy metodom – slika 3.1.3. Pomoću te metode možemo za svaki čelik dobiti određene vrijednosti i kasnije uspoređivati čelike ili predvidjeti prokaljenost kod određenih dimenzija i uvjeta hlađenja.

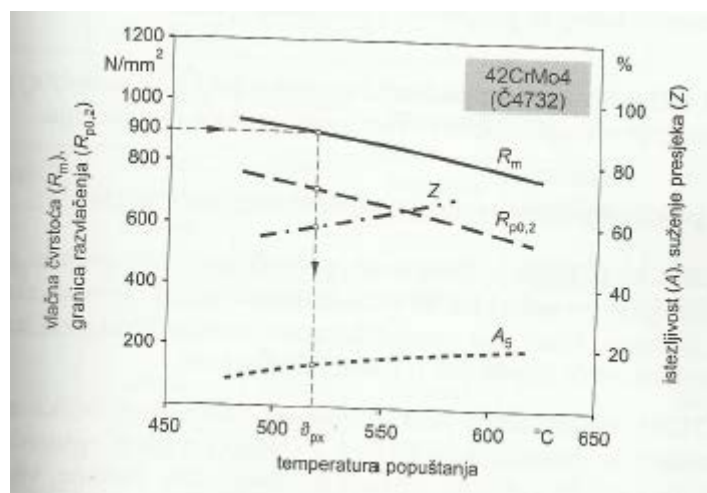


Slika 3.1.2. Ovisnost mehaničkih svojstava o dimenzijama (Č.4732 i Č.4130)[2]



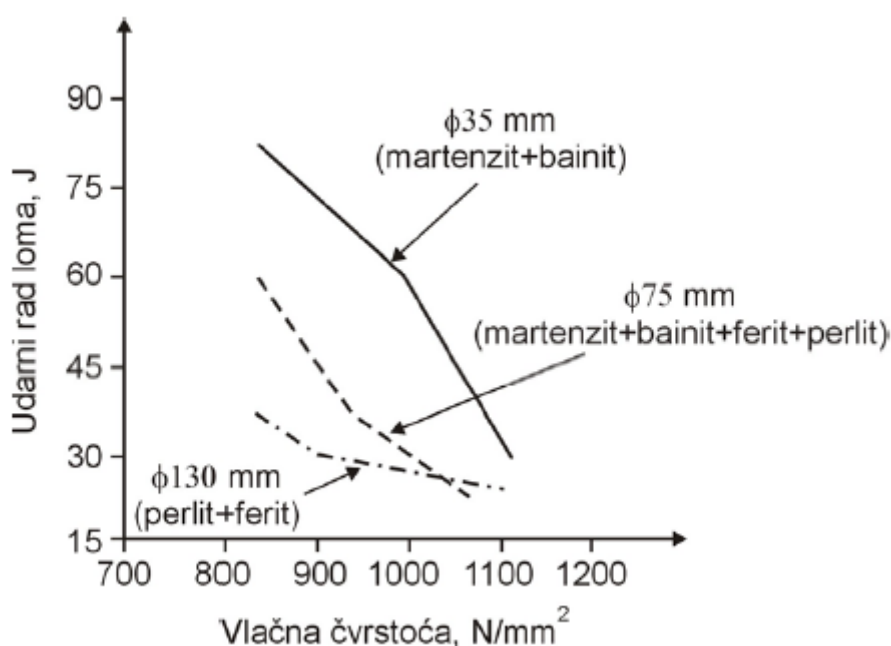
Slika 3.1.3. Jominy krivulja čelika Č.1530 i Č.4732 [2]

Čelici za poboljšanje se mogu nisko i visoko popuštati slika 3.1.4. Nisko popuštanje može se provoditi kod čelika sa nižim sadržajem ugljika i niskouglični martenzit im osigurava žilavost. Niskim popuštanjem možemo postići više vrijednosti granice razvlačenja no proizvod ostaje krhak. Visoko popuštanje se provodi kod srednjougličnog i visokougličnog martenzita zbog postizanja dovoljne žilavosti. Granica razvlačenja najčešće iznosi do 1200 N/mm^2 , dok su temperature popuštanja iznad 500°C ($550 - 680^\circ\text{C}$).



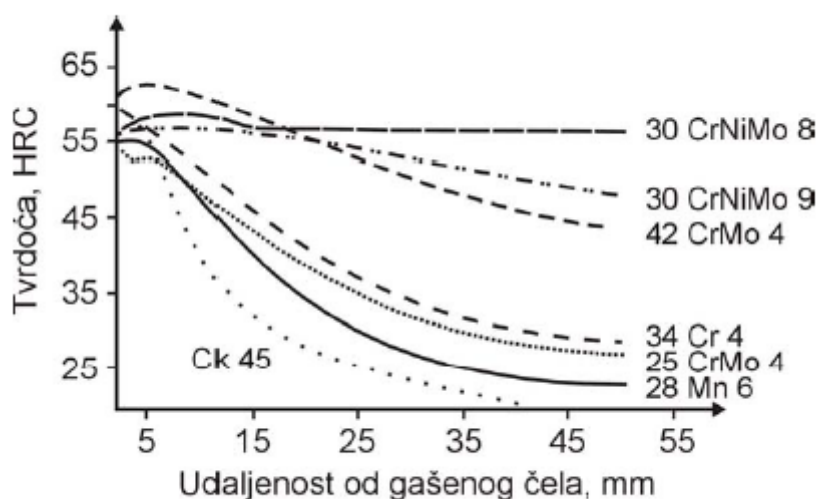
Slika 3.1.4. Ovisnost mehaničkih svojstava o temperaturi popuštanja (Č.4732) [2]

Najbitniji kriterij za odabir čelika za poboljšavanje je što bolja prokaljivost, zapravo da je što viši stupanj legiranosti. To proizlazi iz razloga što prokaljenost ima pozitivan utjecaj na žilavost – slika 3.1.5. Prema toj slici vidljivo je da su povoljni mikrostrukturni konstituenti martenzit i donji bainit, a nepovoljni su gornji bainit, perlit i ferit. Nepovoljni su zato jer nam snižavaju vrijednost udarne radnje loma a to je zbog nejednoličnog rasporeda grubih karbida.



Slika 3.1.5. Utjecaj mikrostrukture nakon gašenja i promjera čelika na vlačnu čvrstoću i udarnu radnju loma (Č.4830) [4]

Čelici za poboljšavanje se uglavnom isporučuju u mekožarenom stanju i obrađuju se odvajanjem čestica. Glavni pokazatelj obradljivosti je najviša dopuštena tvrdoća – slika 3.1.6. Prema slici se vidi da je manganski čelik (28Mn6) bolje prokaljiv od nelegiranog čelika i može se gasiti u ulju. Kako je mangan gamageni element, potiče nastanak grubog zrna i pojavu krhkosti popuštanja. Krhkost popuštanja je pojava pada žilavosti nekih čelika (Mn, Cr, Cr – Mn, Cr – Ni) ako se popuštaju u području od 450 – 600°C. Da bi to spriječili, potrebno je provesti brže hlađenje s temperature popuštanja. Isto tako, dodavanjem slijca (0,8 – 1,2%) možemo djelomično povisiti granicu razvlačenja i tako smanjiti pregrijavanje. Manganski čelici se primjenjuju za promjere do 100 mm i toplinska obrada im je osjetljiva.



Slika 3.1.6. Jominy krivulje prokaljivosti čelika [4]

Čelici legirani kromom (34Cr2) imaju višu granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Krom djeluje pozitivno na usitnjenje zrna i primijenjuje se za promjere do 100mm (iznimno 160 mm).

Čelici legirani Cr – Mo i Cr – Ni – Mo su dobro prokaljivi. Djelovanje molibdena pozitivno utječe na otpornost protiv krhkosti popuštanja jer osigurava martenzitnu i donju bainitnu mikrostrukturu a primijenjuje se kod većih dimenzija (iznad 250 mm) i niskih temperatura (- 70°C). Usitnjavanje zrna djeluje pozitivno na žilavost pri sobnoj i sniženoj temperaturi.

Nelegirani čelici za poboljšavanje primijenjuju se za dimenzije do 40 mm (iznimno 100 mm) jer iznad 40 mm austenit se transformira u perlit + ferit, skloni su pregrijavanju – pojavi grubog zrna u mikrostrukturi.

Č.1530 (C45) - primijenje se za promjere do 40 mm, iznimno do 100 mm za slabije opterećene dijelove (osovine, vijke, vretena, klipnjače itd.) i često je u normaliziranom stanju.

Č.4732 (42CrMo4) - primijenjuje se za veće dimenzije (do 100 mm) i viša radna opterećenja kao npr. dijelovi vozila i zrakoplova (kardanske osovine, koljenaste osovine, poluosovine automobila, zupčanci itd.).

Č.5432 (30CrNiMo8) – primijenjuje se za velike dimenzije (preko 150 mm) jer je najbolje prokaljiv. Ima najvišu granicu razvlačenja i udarni rad loma. Zbog legiranja sa niklom je najskuplji a koristimo ga kod velikih zupčanika, osovina turbogeneratorsa, ekscentra osovina itd.

Detaljan prikaz čelika dan je u tablica 3.1.2.

Tablica 3.1.2. Čelici za poboljšavanje [4]

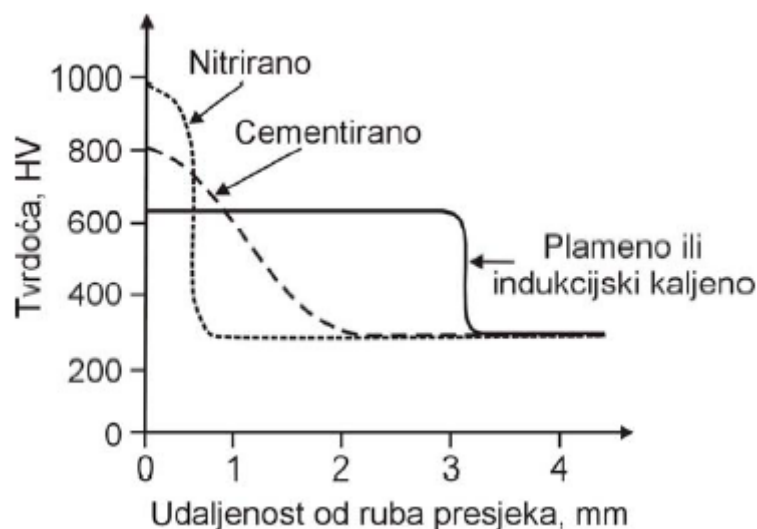
Oznaka čelika		Sastav "ostalo" %	Stanje meko žareno HB _{max}	Promjer proizvoda 16-40 mm*				Promjer proizvoda 160-250 mm*				Toplinska obradba, °C/hlađenje	
DIN 17006	HRN			R _m , N/mm ²	R _{p0.2} , N/mm ² , min.	A ₅ , %	KV, J, min.	R _m , N/mm ²	R _{p0.2} , N/mm ² , min.	A ₅ , %	KV, J, min.	Kaljenje	Popuštanje
C35 Ck35	Č1330 Č1331	-	172	580-730	365	19	41					840-870 voda	550-660 zrak, peč
C45 Ck45	Č1530 Č1531	-	206	660-810	410	16	27					820-850 voda	550-660 zrak, peč
C60 Ck60	Č1630 Č1631	-	243	780-930	490	13	-					800-830 voda	550-660 zrak, peč
28 Mn 6	Č3135		223	690-840	490	15	48					830-860 voda, ulje	550-660 ulje
34 Cr 4	Č4130		217	780-930	590	14	48					840-870 voda, ulje	540-680 ulje
25 CrMo 4	Č4730	0,2 Mo	217	780-930	590	14	55					850-880 ulje	540-680 zrak, peč
34 CrMo 4	Č4731	0,2 Mo	217	880-1080	665	12	50	690-840	460	15	48	840-870 ulje	540-680 zrak, peč
42 CrMo 4	Č4732	0,2 Mo	217	980-1180	765	11	41	740-890	510	14	41	830-860 ulje	540-680 zrak, peč
30 CrMoV 9	Č4734	0,2 Mo 0,15 V	248	1230-1430	1030	9	34	880-1080	685	12	48	850-880 ulje	540-680 zrak, peč
50 CrV 4	Č4830	0,15 V	235	980-1180	785	10	34	780-930	590	13	34	830-860 ulje	540-680 zrak
36 CrNiMo 4	Č5430	1 Ni 0,2 Mo	217	980-1180	785	11	41	740-890	540	14	48	830-860 ulje	540-680 zrak
30 CrNiMo 8	Č5432	2 Ni 0,4 Mo	248	1230-1430	1030	9	34	880-1080	685	12	48	830-860 ulje	540-680 zrak

* Nakon popuštanja pri 600 °C

Obzirom na njihovu namjenu, čelike za poboljšavanje dijelimo u dvije podskupine:

1. Čelici za površinsko kaljenje

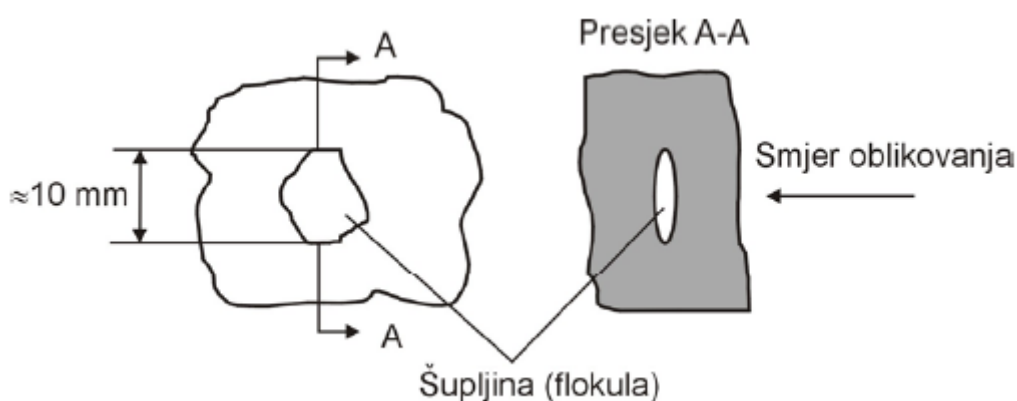
Površinskim kaljenjem (plameno ili indukcijsko) možemo postići visoku otpornost na trošenje i dinamičku izdržljivost površinskog sloja. Time postizemo da svojstva površine budu usporediva sa svojstvima cementiranog čelika, ali su svojstva sredine presjeka znatno bolja. Mogu se kaliti nelegirani i niskolegirani čelici s oko 0,35 – 0,60% ugljika koji se zbog visoke toplinske vodljivosti mogu brzo grijati i hladiti (voda ili ulje) a da ne dođe do velikih toplinskih naprezanja i površinskih napuknuća. Imaju sniženi udio fosfora (manje od 0,025% nelegirani i manje od 0,035% niskolegirani) i visoke su čistoće što im osigurava visoku žilavost i jednoličnost tvrdoće zakaljenog sloja – slika 3.1.7. Najčešće su to Č.1431, Č.1531, Č.1633, Č.4133, Č.4732 i koriste se za koljenaste osovine, bregaste osovine, zupčanike, lančanike, vretena itd.



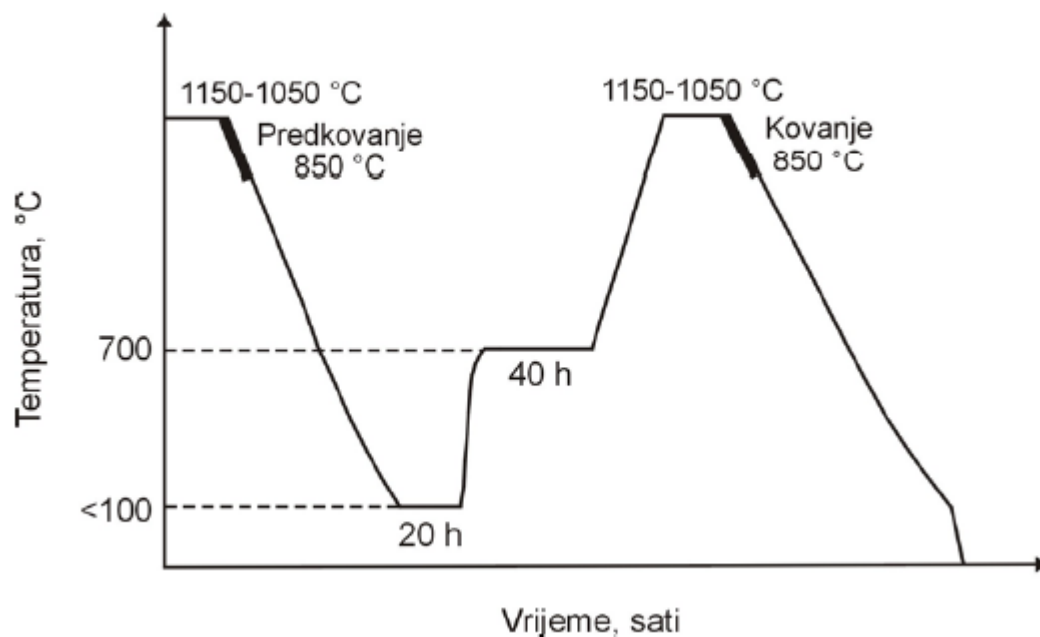
Slika 3.1.7. Usporedba tvrdoće površinskog sloja toplinskim obradama [4]

2. Čelici za velike otkovke

Primijenjuju se kod otkovaka velikih masa i promjera preko 100 mm. Zbog toga se kod hlađenja javljaju temperaturne razlike između površine i sredine presjeka što utječe na pojavu zaostalih naprezanja te se javlja opasnost od pukotina. Posebna je opasnost od pojava prisutnosti otopljenog vodika i stvaranja tzv. flokula (šupljine u obliku pahuljica). Prilikom hlađenja, vodik koji je otopljen tijekom rastaljivanja ili kovanja, ne može ispariti i nakuplja se na mjestima defekata (najčešće uključcima ili primarnim granicama zrna). Tu dolazi do porasta tlaka i stvaranj šupjina i pukotina – slika 3.1.8. Da bi to spriječili, čelici moraju biti jako čisti i otplinjeni u vakumu. Teži se odsutnosti segregacija i mikropukotina te jednoličnoj mikrostrukturi i svojstvima po presjeku (izotropija). Za uklanjanje vodika provodimo i žarenje velikih otkovaka – slika 3.1.9.



Slika 3.1.8. Shematski prikaz flokula [4]



Slika 3.1.9. Dijagram žarenja velikih otkovaka [4]

Izborom vrste legiranih elemenata težimo bainitnoj strukturi jezgre te ih legiramo sa molibdenom da izbjegnemo pojavu krhkosti popuštanja. Primjena ovih čelika je u cjevovodima i dijelovima visokotlačnih spremnika, osovina parnih turbina i generatora, koljenastih osovina, prirubnica itd. Detaljan prikaz čelika za velike otkovke dat je u tablici 3.1.3.

Tablica 3.1.3. Čelici za velike otkovke [4]

Oznaka čelika VDEh	Sastav, ostalo, %	Promjer, mm	Svojstva pri 20 °C						
			R _{p0.2} , N/mm ² , min.	R _m , N/mm ²	A ₅ , %		KV, J		Stanje
Ck22	-	do 250 250-500	225 215	410-540	uzd. min. 26 25	popr. min. 19 17	uzd. min. 51 41	popr. min. 34 27	normalizirano
Ck45	-	do 250 250-500	345 325	590-740	18 17	12 11	31 27	17 14	
Ck60	-	do 250 250-500	390 355	690-840	15 14	10 9			
22NiMoCr 3 7 24 CrMo 5	0,4 Cr 0,25 Mo	do 500 do 250 250-500	400 410 375	560-710 640-790 590-740	19 17 18	15 13 14	41 48	24 34	poboljšano
42 CrMo 4	0,25 Mo	do 250 250-500	510 460	740-890 690-840	14 15	10 11	38	21	
34 CrNiMo 6	0,25 Mo 1,55 Ni	do 250 250-500 500-1000	590 540 490	780-930 740-890 690-840	13 14 15	9 10 11	41	31	
28NiCrMoV 8 5	0,45 Mo <0,15V	do 500 500-1000 1000-1500	635 590 540	780-930 740-890 690-840	14 15 16	10 11 12	41	34	
33NiCrMo 14 5	0,45 Mo	do 1000 1000-1500 1500-2000	785 735 685	930-1130 880-1080 830-980	12 13 14	8 9 10	34	24	

4. Toplinska obrada

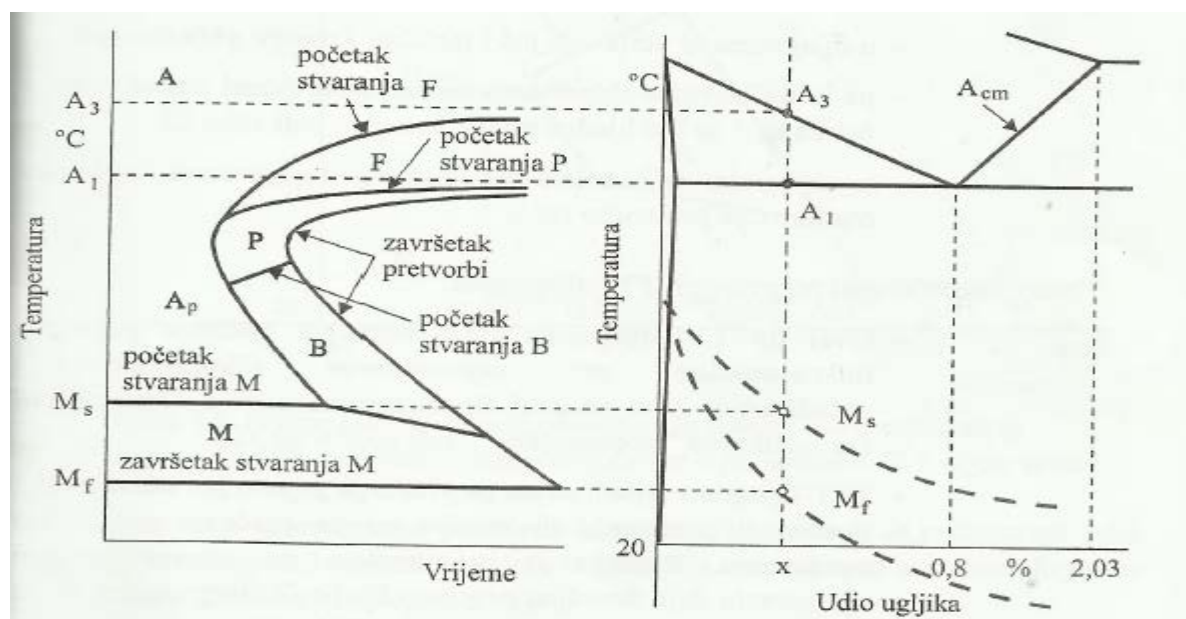
Toplinska obrada se provodi s ciljem mijenjanja mikrostrukture materijala u svrhu zantnijeg povećanja čvrstoće. Zapravo nastaju novi mikrostrukturni oblici različiti od onih u pripadnim ravnotežnim stanjima. Predmet namjerno podvrgavamo temperaturno – vremenskim ciklusima kako bi postigli željena mehanička, fizička i kemijska svojstva. Tako povećavamo vlačnu čvrstoću, žilavost, smanjujemo unutrašnja naprezanja. Temeljni parametri postupaka su temperatura (T (K), Φ (°C)) i trajanje (t , (s, min, h)). Stavljajući ta dva parametra u omjer dobijemo treći parametar a to je brzina ohlađivanja, odnosno grijanja:

$$\frac{dT}{dt} = \nu \text{ (} ^\circ\text{C/s, } ^\circ\text{C/min, } ^\circ\text{C/h) }.$$

Uz $t_{\text{ohl}} \neq \infty$ (tj. uz uvjet $\nu_{\text{hl}} \rightarrow \emptyset$) u Fe – Clegurama omogućuje se potpuna difuzija atoma željeza i ugljika. Skraćujemo li trajanje ohlađivanja t_{ohl} sve više i povisujemo li brzinu ohlađivanja ν_{hl} , difuzija je sve nepotpunija, pa čak i potpuno izostaje ako ν_{hl} prekorači neku graničnu vrijednost.

Temelj toplinske obrade je autektoidna reakcija raspada austenita na ferit i cementit. Odabirom postupka toplinske obrade mijenjamo i načina raspada austenita i zato nam je potrebno najprije provođenje austenitizacije za dobivanje austenita. Austenitizacija je postupak zagrijavanja čelika na temperaturu malo iznad A_1 kod eutektoidnog, A_3 kod podeutektoidnog ili A_{cm} kod nadeutektoidnog sastava u svrhu dobivanja homogenog austenita. Kod ugljičnih čelika pretvorba austenita u perlit je oko 723°C do približno 500°C. Ispod 500°C do 250°C kod izotermne pretvorbe nastaje bainit, a ispod 250°C martenzit.

Pretvorbu austenita u druge faze u ovisnosti o brzini hlađenja pratimo putem TTT – dijagrama (eng. Time, Temperature, Transformation = vrijeme, temperatura, pretvorba) koji su različiti za različite čelike. Pomoću njih određujemo količinu pretvorenog austenita u funkciji brzine i temperature ohlađenja. Također je vidljiva vrsta i količina nastalih faza prema slici 4.1.



Slika 4.1. Konstrukcija TTT – dijagrama. [3]

F – pretvorba austenita u primarni ferit

P – pretvorba austenita u perlit

B – pretvorba austenita u bainit

M – pretvorba austenita u martenzit.

Toplinske obrade se mogu podijeliti u četiri vrste:

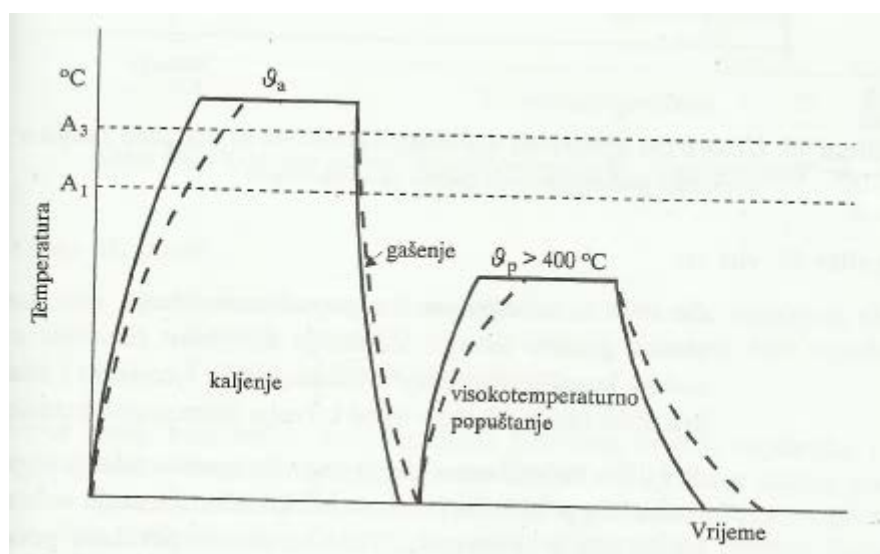
- termička,
Komadi se griju zatim drže na određenoj temperaturi određeno vrijeme i potom se hlade. To su žarenje (približavanje ravnoteži mikrostrukture), kaljenje (proces austenitizacije a zatim brzim ohlađivanjem se sav austenit pretvara u martenzit), popuštanje (metal grijemo do ispod austenitizacije, držimo neko vrijeme i potom sporo hladimo), poboljšanje (sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja na visokim temperaturama) i normalizacija (austenitizacija i ohlađivanje na zraku).
- termokemijska ili otvrdnjavanje površine čelika,
Toplinska obrada se obavlja u kemijski aktivnoj sredini. To su pougličanje ili cementacija (povećanje sadržaja ugljika u površinskom sloju), nitriranje (povećanje sadržaja dušika u površinskom sloju), karbonitriranje (povećanje i ugljika i dušika u površinskom sloju), boriranje (povećanje sadržaja bora u površinskom sloju).
- termomehanička,
Termička obrada se kombinira s mehaničkim deformiranjem.
- prirodno i umjetno starenje.
Starenje pri sobnoj temperaturi i starenje pri povišenoj temperaturi.

Svrha ovog rada su čelici za poboljšavanje i postupak poboljšavanje će biti detaljno objašnjen u poglavlju 4.1.

4.1. Poboljšavanje čelika

Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade kojim se obrađuju ugljični čelici (0,3 – 0,6% ugljika) i niskolegirani čelici za poboljšavanje. Postupak toplinske obrade sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (iznad 400°C) – slika 4.1.1. Glavna svrha je postizanje visoke granice tečenja i visoke žilavosti, a rezultati su bolji što je čelik gašenjem jednoličnije prokaljen.

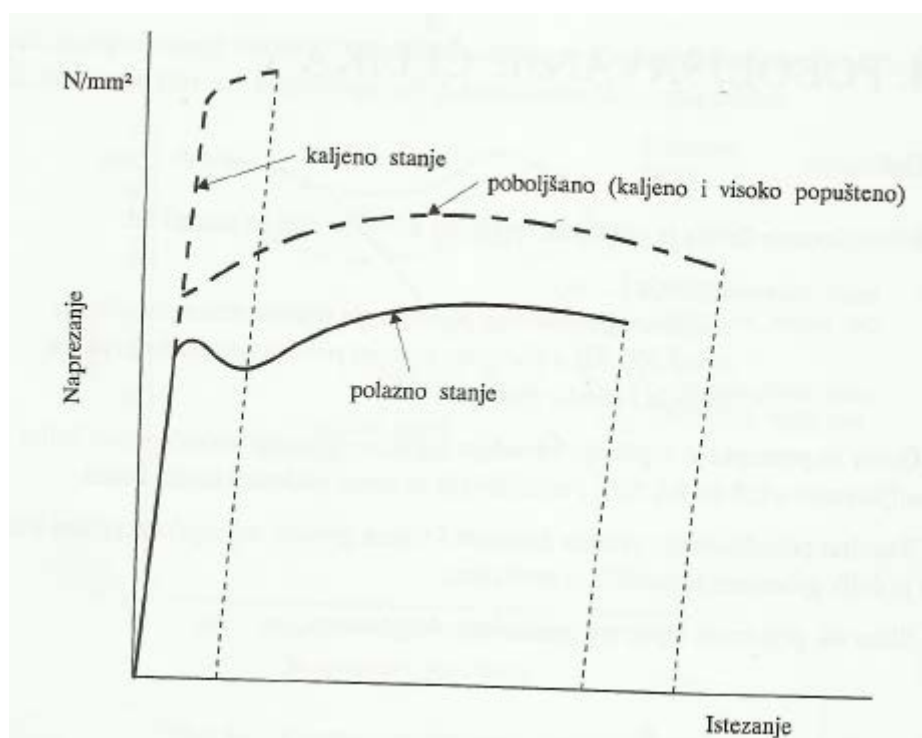
Poslije provedenog kaljenja, čelik ima veliku čvrstoću ali i veliku krhkost. Moramo provesti popuštanje da vratimo žilavost i duktilnost. Popuštanje se sastoji od zagrijavanja na određenu temperaturu do ispod A_1 , izotermnog držanja na toj temperaturi i ohlađivanja primjerenom brzinom.



Slika 4.1.1. Dijagram postupka toplinske obrade poboljšavanja [3]

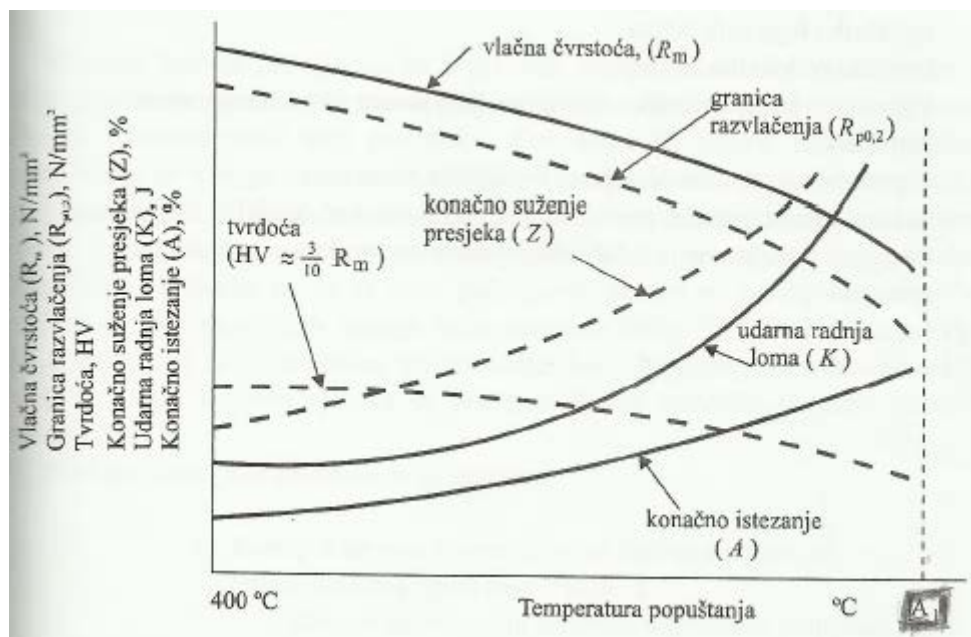
Gašenje čelika je ohlađivanje čelika s temperature austenitizacije brzinama većim od brzina koje odgovaraju ohlađivanju na mirnom zraku. Gašenje onemogućuje ravnotežne pretvorbe i zbog toga dobivamo nestabilno stanje.

Čelik u zakaljenom i nepopuštenom stanju ima visoku granicu tečenja, ali slabu duktilnost i nisku žilavost. Provođenjem postupka poboljšavanja povišujemo mu granicu tečenja s time da mu povećavamo duktilnost. Tako se znatno poveća površina ispod krivulje razvlačenja a rezultat toga je povišenje žilavosti, kako prije poboljšavanja tako i nakon kaljenog nepopušenog stanja – slika 4.1.2.



Slika 4.1.2. Dijagram naprezanje – istezanje za pojedina stanja postupkom poboljšavanja [3]

Mehanička svojstva zavise od temperature popuštanja. Što je viša temperatura popuštanja time su niže vrijednosti vlačne čvrstoće, granice tečenja i tvrdoće, odnosno dobivamo više vrijednosti žilavosti, istezanja i kontrakcije – slika 4.1.3.



Slika 4.1.3. Kvalitativni dijagram poboljšavanja čelika [3]

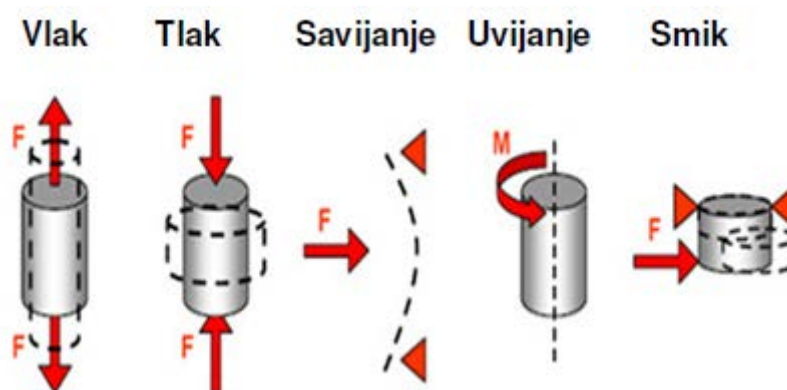
Na osnovu analize naprezanja u radu odlučujemo se hoćemo li dati prednost visokoj granici tečenja na račun žilavosti ili ćemo dati prednost višij žilavosti na račun granice tečenja. Žilavost nam je potrebna za slučaj izrazito udarnog naprezanja. Temperaturom popuštanja određujemo optimalni kompromis između ove dvije suprotne vrijednosti.

5. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Mehanička svojstva materijala su nama jako bitna zbog eksploatacije proizvoda i na osnovu njih se konstruiraju i dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Zauzimaju posebno mjesto između ostalih fizikanih i kemijskih svojstava jer su posljedica strukturnog stanja materijala koje se dobiva obradom materijala. Obrađuje se materijal određenog sastava i obrađuje se određenim tehnološkim postupkom čiji izbor daje željena svojstva. Uvrštavanjem tih svojstava u proračune dobivamo vrijednosti koje nam služe prilikom dimenzioniranja. Idealne tvari možemo proračunati koristeći strukturne parametre. U realnim tvarim uočene su mikrostrukturne nepravilnosti koje nije moguće uočiti i obuhvatiti proračunom nego samo eksperimentalnim ispitivanjem.

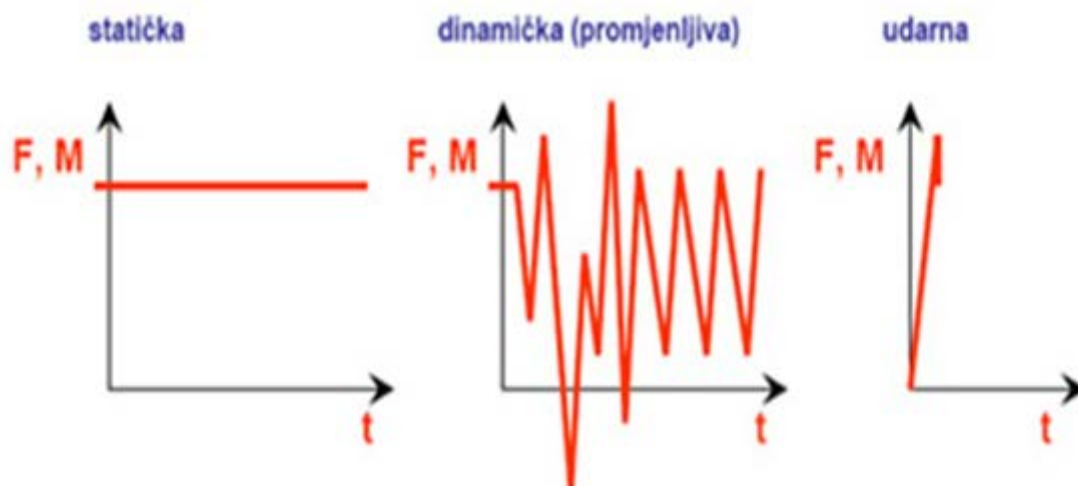
Eksperimentalno ispitivanje se provodi pomoću uređaja i strojeva posebno razvijenih za ispitivanje a provodi se tako da se epruvete (ispitni uzorci) opterećuju na način na koji će biti opterećene u radu. Najvažnija svojstva koja dobivamo ispitivanjem su čvrstoća, tvrdoća, žilavost, zamor i puzanje. Ovim završnim radom ćemo ispitivati materijal na čvrstoću, tvrdoću i žilavost.

Prema načinu djelovanja opterećenja imamo vlačno, tlačno, opterećenje na savijanje, uvijanje i smik – slika 5.1.



Slika 5.1. Vrste i djelovanje opterećenja [5]

Prema brzini djelovanja opterećenja imamo statička i dinamička – slika 5.2. Statička opterećenja su obično kratkotrajna (oko 10 min), a neka mogu biti i dugotrajna (od 45 min do 100 000 sati). Dugotrajno ispitivanje se provodi kod ispitivanja puzanja i zamora materijala. Dinamička ispitivanja mogu biti udarna (oko 5,5 m/s kod Charpyevog bata) ili promjenjiva (s istosmjernim ciklusima vlaka ili tlaka).

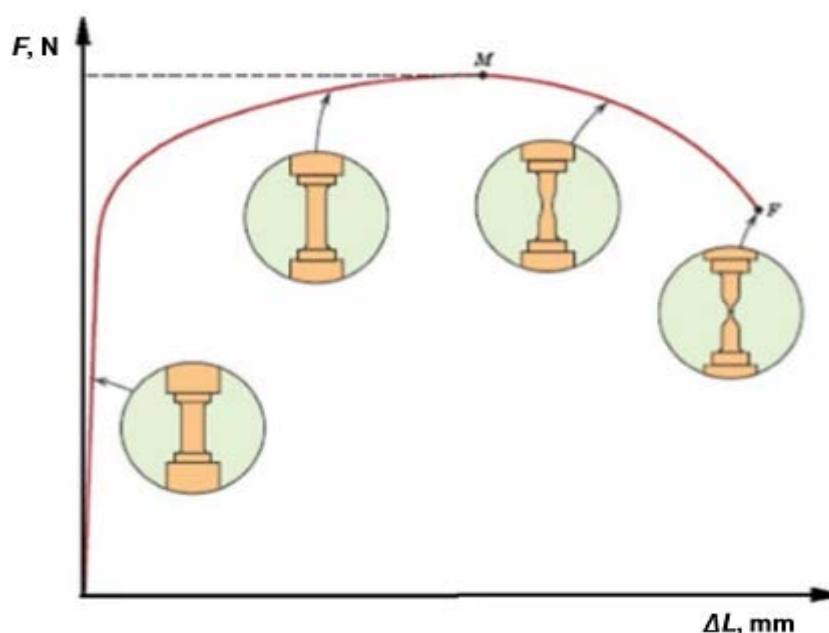


Slika 5.2. Statičko i dinamičko djelovanje opterećenja. [5]

Ispitivanja se može provoditi pri sobnim, povišenim ili sniženim temperaturama. Najčešće ispitivanje je pri sobnoj temperaturi između 10°C i 35°C . Snižene temperature su na -20°C , a povišene na od $+400^{\circ}\text{C}$ i više.

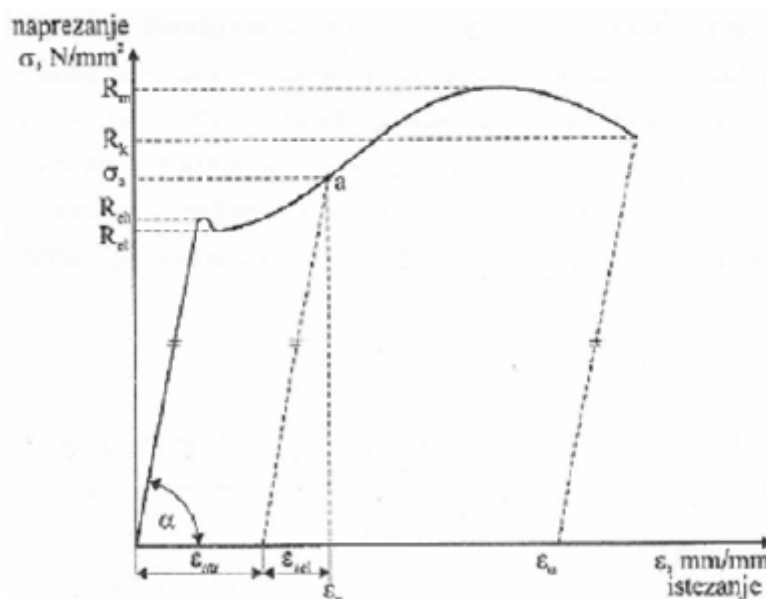
5.1. Statičko vlačno ispitivanje

Provodimo ga prema normi HRN EN ISO 6892-1 te njime ispitujemo elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja. Osnovne vrijednosti koje dobivamo su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i dr. Ispituju se epruvete (normiranog oblika i dimezija) na uređajima tzv. Kidalice. Epruvete kontinuirano opterećujemo sve do loma, a mjerimo sile i produljenje epruvete. Izmjerene vrijednosti sila i produljenja koristimo za grafičko određivanje dijagrama „sila - produljenje“ – slika 5.1.1.



Slika 5.1.1. Dijagram sila – produljenje. [5]

Dijagramom $F - \Delta l$ dobivamo vrijednosti pomoću kojih konstruiramo dijagram naprezanje istezanje ($\sigma - \varepsilon$). Dijagram za „meki“ čelik izgleda – slika 5.1.2.



Slika 5.1.2. Dijagram $\sigma - \varepsilon$ za „meki“ čelik [5]

gdje je:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Gornja granica razvlačenja,}$$

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Donja granica razvlačenja,}$$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Vlačna čvrstoća,}$$

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \frac{N}{mm^2} - \text{Konačno naprezanje.}$$

Vrijednosti istezanja nakon loma određuju se izrazom:

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \frac{mm}{mm}$$

gdje je:

L_u – ukupno produljenje epruvete (mm),

L_0 – početna duljina epruvete (mm),

ΔL_u – razlika produljenja epruvete i početne duljine (mm),

$\mathcal{E}_u$ – relativno produljenje (mm/mm).

Ovim pokusom također utvrđujemo i istežljivost materijala „A“ koje je definirano izrazom:

$$A = \mathcal{E}_u \cdot 100, \%$$

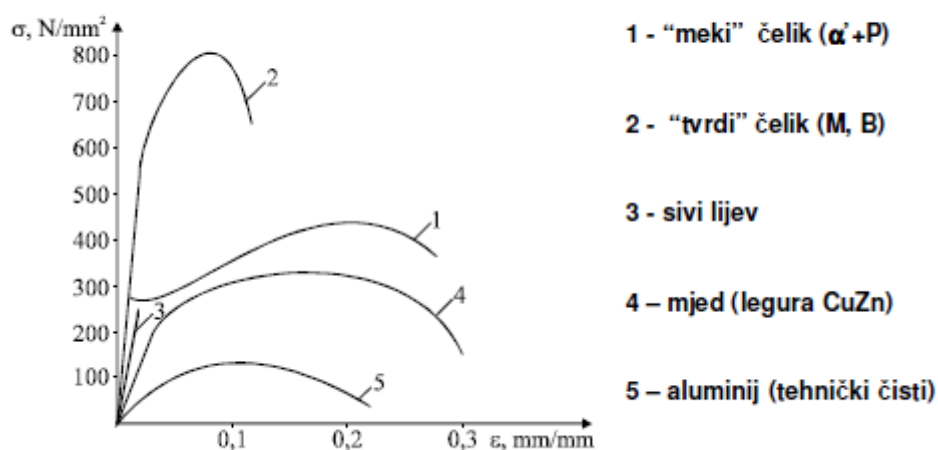
Ovisnot promjene oblika čvrstog tijela u obliku štapa o djelovanju vanjske sile je zakonitost koju opisuje Hookeov zakon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \frac{N}{mm^2}.$$

gdje je:

E – modul elastičnosti ili Youngov modul ($\frac{N}{mm^2}$).

Dijagrami naprezanje – istežanje za neke metalne materijale – slika 5.1.3.

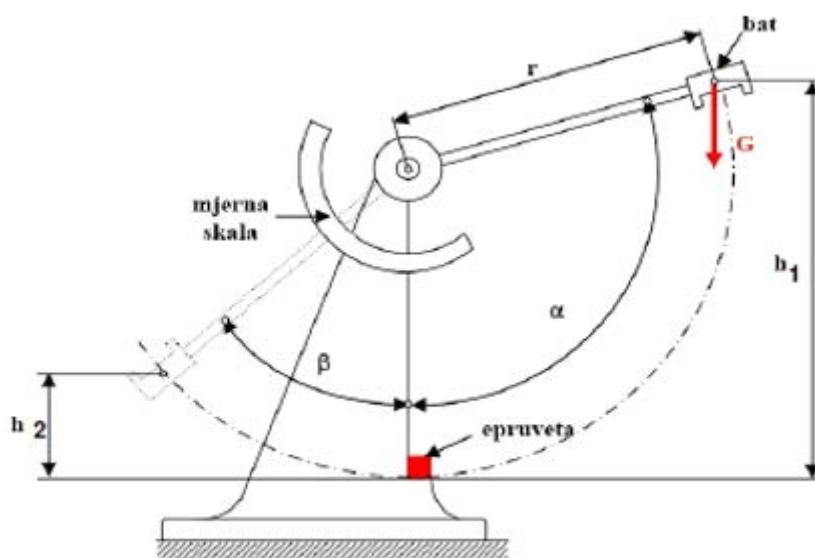


Slika 5.1.3. Dijagrami $\sigma - \varepsilon$ za neke metalne materijale.[5]

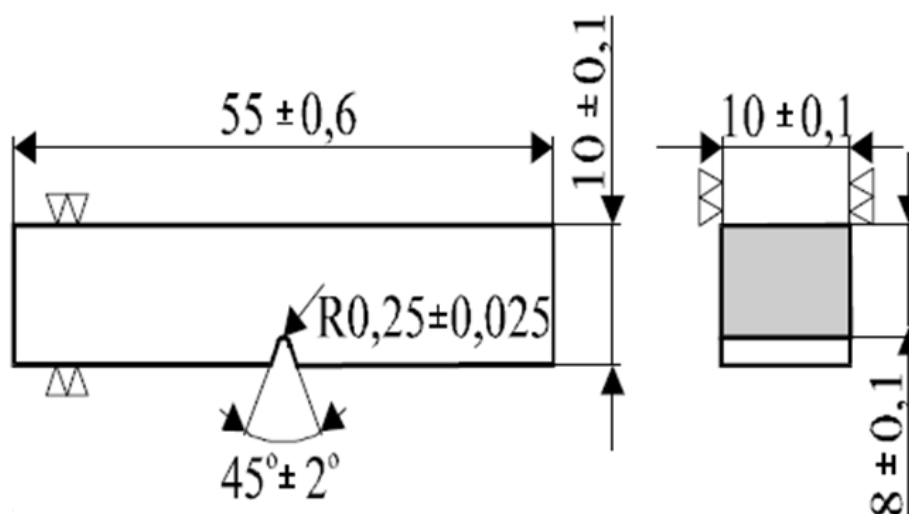
5.2. Ispitivanje udarnog rada loma (žilavosti) – metoda Charpy

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja, a ispitivanje se provodi na Charpyevom batu – slika 5.2.1. Epruveta – slika 5.2.2., se prelama batom koji padom udari u sredinu epruvete. Bat težine G podiže se na visinu h_1 i posjeduje potencijalnu energiju $E_p = G \cdot h_1$ ($N \cdot m = J$). Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi u kinetičku. Bat je konstruiran tako da u najnižem položaju sva potencijalna energija se pretvara u kinetičku, a ako ne udari u ispitni uzorak, bat se penje na istu visinu s koje je pušten. Udarni rad loma zatim se računa prema jednadžbi :

$$KV = G \cdot (h_1 - h_2), (J).$$



Slika 5.2.1. Shema Charpyevog bata [5]



Slika 5.2.2. Dimenzije epruveta za ispitivanje sa „V“ utorom [5]

5.3. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoće je definirana kao otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatnije tvrdog tijela u materijal.

Ispitivanjem tek neznatno oštećujemo površinu ispitivanog predmeta i to je najčešće upotrebljavano ispitivanje. Danas se najviše koriste tri glavne metode:

- Metoda po Brinell-u
- Metoda po Vickers-u
- Metoda po Rockwell-u.

Osnovni princip mjerenja je mjerenje veličine ili dubine utiska što ga penetrator utisne u ispitivanom materijalu.

5.3.1. Metoda po Brinell-u

Metodu je napravio švedski inženjer J. A. Brinell 1900. i specifična je pojednostavnosti pripreme površine i lakoći mjerenja veličine otiska. Ispitivanje spada u grupu ispitivanja materijala bez razaranja i to je postupak utiskivanjem (penetracijom).

Penetrator je kuglica od tvrdog metala, promjera D, koja se utiskuje silom F u površinski sloj materijala slika 5.3.1.1. Utisak je promjera baze „d“ i dubine „h“. Sama tvrdoća je omjer primjenjene sile i ploštine otiska:

$$HB = \frac{F}{S} ,$$

F – sila kojom je opterećena kuglica (N),

S – ploština otiska, mm² .

Pomoću mjerne leće mjeri se promjer „d“ i tvrdoća se određuje prema izrazu:

$$H_{WB} = 0,102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{(D^2 - d^2)})} ,$$

F – sila kojom je opterećena kuglica (N),

D – promjer zakaljene čelične kuglice (mm),

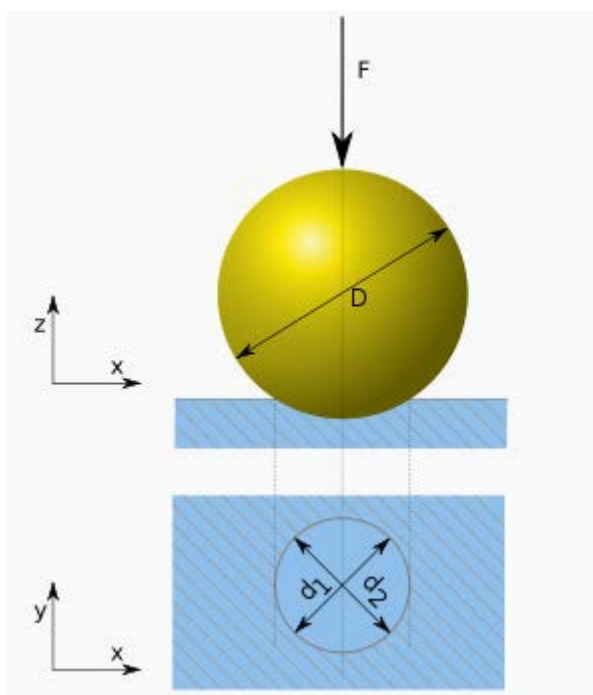
d – srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale (mm).

Kuglice su normiranog promjera D i iznose 10, 5, 2.5 i 1 mm, a mjerenje je valjano ako promjer baze kuglinog utiska d iznosi:

$$d = (0,24 - 0,6) D .$$

Ukoliko utisak nije u ovim granicama zanči da smo primijenili malu ili preveliku silu F. Veličina kuglice D koju treba primijeniti i iznos sile F ograničeni su debljinom uzorka h i to:

$$h \geq 0,6 D .$$



Slika 5.3.1.1. Prikaz ispitivanja po Brinell metodi [6]

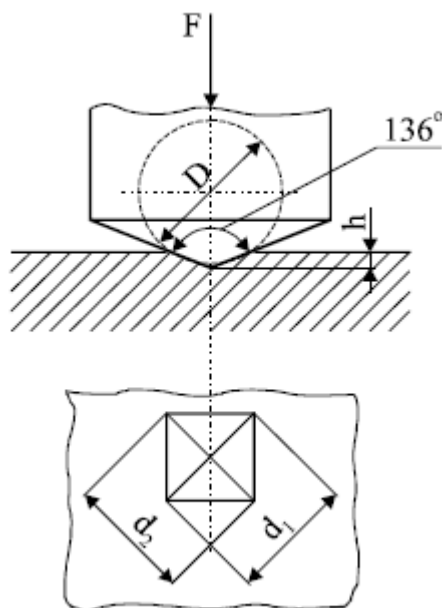
Trajanje mjerenja je ograničen i omogućava ravnotežu između utiskivača i plastično deformiranog zrna. Povećanje sile do konačne vrijednosti traje 15 sekundi, a njeno djelovanje traje 15, 30 ili 60 sekundi. Što je materijal mekši to ispitivanje traje duže.

Tvrdoća po Brinellu primijenjuje se za sve metalne konstrukcije, a ispitivanje sa zakaljenom čeličnom kuglicom (HBS) koristi se do 450 HB dok se kuglica od tvrdog metala (HBW) koristi do 650 HB.

Nedostatak ove metode je nemogućnost mjerenja materijala visoke tvrdoće, tvrdoća zavisi od opterećenja i treba izabrati odgovarajuću silu.

5.3.2. Metoda po Vickersu

Razvijena je u tvrtci Vickers Ltd sa ciljem uklanjanja dva osnovna nedostatka Brinellove metode – slika 5.3.2.1. Prvi nedostatak je uklonjen uporabom najtvrdjeg materijala za penetrator – dijamant. Drugi nedostatak je uklonjen oblikom penetratora koji ima oblik četverostrane piramide s kutem između nasuprotnih stranica od 136° . Zahvaljujući tom kutu koji zatvaraju tangencijalne ravnine na Brinellovoj kuglici pri optimalnoj veličini otisnuća dobivaju se vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili. Tako se može mjeriti tvrdoća i mekih i tvrdih materijala i to s različitim opterećenjima.



Slika 5.3.2.1 Prikaz ispitivanja po Vickers metodi [5]

Tvrdoću po Vickersu izračunavamo izrazom:

$$HV = \frac{F}{S},$$

gdje je:

F – primijenjena sila (N),

S – ploština šuplje piramide nastale u materijalu (mm²).

Dijagonala baze utisnuća mjeri se pomoću mjernog mikroskopa, a ploština utisnuća izražava se pomoću dijagonale „d“ te proizlazi izraz:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2},$$

gdje je:

F – sila (N),

d – srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale otiska (mm).

Iznosi sile utiskivanja je od 49 do 980 N. Ispod 49 N (od 1,96 do 49 N) govorimo o semimikrotvrdoći ili tvrdoći tankih uzoraka i slojeva. Tvrdoće niže od 1,96 N su mikrotvrdoće i na taj način moguće je mjeriti tvrdoću pojedinih faza.

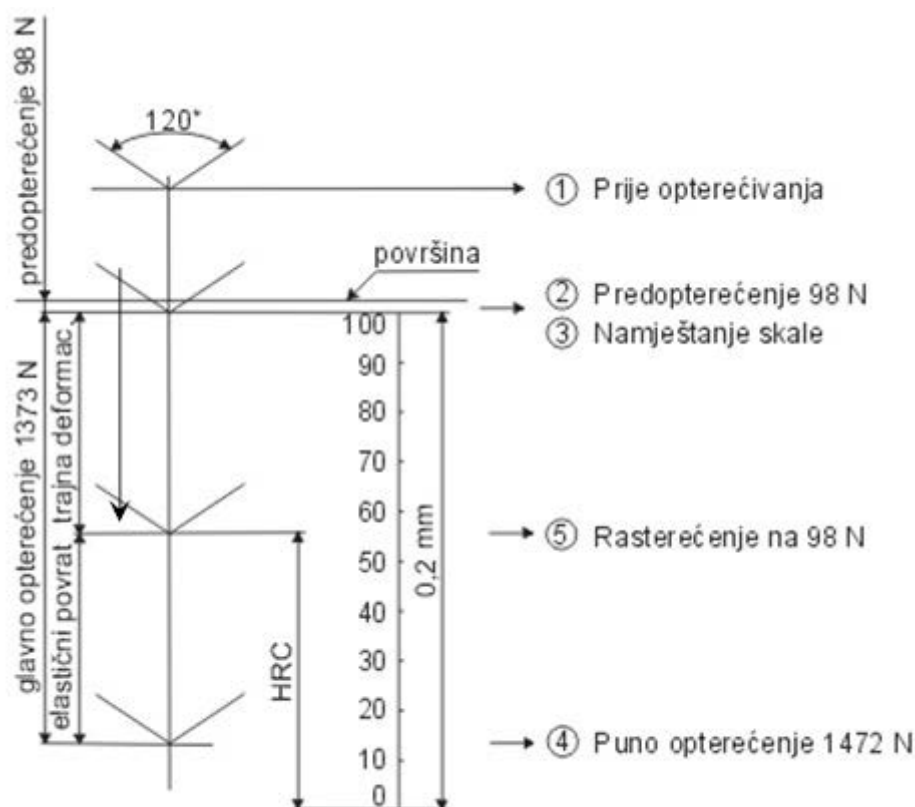
Prednosti Vickersove metode su u neovisnosti o primijenjenoj sili, moguće je mjeriti i najtvrdje materijale te vrlo tanke uzorke i pojedine faze. Utisak je vrlo malen i ne oštećuje površinu.

Jedini nedostaci na koje se nailazi je u brižljivoj pripremi površine uzorka (poliranje) dok nam je za mjerenje veličine otiska potreban mjerni mikroskop.

5.3.3. Metoda po Rockwell-u

Specifičnost ove metode je mjerenje dubine prodiranja penetratora u materijal. Penetratori su napravljeni od dijamantnog stožca (HRC metoda) ili od kuglica od kaljenog čelika (HRB metoda). Osim ove dvije metode koriste se još i HRA ili HRD (za tvrde karbidne kovine), HRF (za hladno valjani tanki lim i bakar), HRG (za slitine bakra s fosforom).

Postupak se provodi da se utiskivač prisloni na površinu početnom silom F_0 (obično 100 N) pri čemu ostavi utisak h_0 i to se uzima kao ishodišni položaj. Zatim se povećava opterećenje utiskivača (od 1 do 8 sekundi) dodatnom silom F_1 , do ukupne sile F . Trajanje opterećenja ukupnom silom F je $4s \pm 2s$ i potom uklonimo dodatnu sili F_1 te se pri opterećenju početnom silom F_0 očitava dubina utiska h – slika 5.3.3.1.



Slika 5.3.3.1. Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće po HRC metodi [5]

Prednost ove metode je brzo mjerenje gdje se tvrdoća očitava na skali tvrdomjera te nije potreban brižljiva priprema mjerne površine.

Nedostatak ove metode je u slaboj selektivnosti. Čitavo mjerno područje je od 0 do 100 HRC teoretski, a stvarno od 20 do 70 HRC sa nepreciznošću od $\pm 1,5$ HRC. Ova metoda se uglavnom koristi u pogonima za mjerenje toplinski obrađenih čelika.

5.4. Metalografija

Metalografija se bavi istraživanjem strukture metala i legura pomoću svjetlosnog (metalografskog) i elektronskog mikroskopa. Povećanje treba biti barem 25 puta da bi mogli obaviti analizu mikrostrukture, dok je makrostruktura vidljiva golim okom. Analizom dobijemo podatke o veličini kristalnih zrna, prisutne faze i raspodjelu faza, kemijsku homogenost, deformacije strukture nastale nakon plastične deformacije materijala, debljinu i strukturu površinskih prevlaka te određivanje pukotina i načina loma.

Uzorak se priprema na način da se uzme reprezentativnog uzorka iz osnovnog materijala kojemu se ispolira površina polimernom smolom. Zatim se takva površina odmašćuje, ispira i suši te se kemijski nagriza. Na kraju se opet ispiruje i suši.

Metalografija se provodi na način da se koristi svjetlo koje pada na površinu uzorka. Svjetlosnim (metalografskim) mikroskopom se poveća slika površine metalnog uzorka. Elektronski mikroskop koristi snop elektrona za pregled površine uzorka i prednost nad svjetlosnim (metalografskim) mikroskopom je velika rezolucija, od svega nekoliko desetina nanometra.

6. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio je proveden na temelju plana pokusa prema tablici 6.1. i 6.2. Štapovi za žilavost su isto poboljšani sa tim uzorcima.

Tablica 6.1. Plan pokusa sa parametrima poboljšavanja

ČELIK	PARAMETRI POBOLJŠAVANJA			
	TA štapovi 1	TA štapovi 2	TA štapovi 3	TA štapovi 4
Č. 1531	870 / ulje	885 / ulje	860 / voda	900 / ulje
Č. 4731	870 / ulje	885 / ulje	860 / ulje	900 / ulje
Č. 5432	870 / ulje	885 / ulje	860 / ulje	900 / ulje

Tablica 6.2. Plan pokusa sa temperaturama visokog popuštanja

Temperatura visokog popuštanja (°C)	Oznake probnog uzorka
550 °C	1
570 °C	2
590 °C	3
610 °C	4

Uzorci za žilavost austenitiziraju se na 870 °C sa 1 visokim popuštanjem na oko 570 °C.

Eksperiment je proveden na radnom mjestu kidalica - slika 6.1. i to prije toplinske obrade 3 epruvete i poslije toplinske obrade s 15 epruveta te 3 epruvete za ispitivanje žilavosti na Charpyevom batu - slika 6.2.



Slika 6.1. Radno mjesto kidalica Otto Wopert Werke U60



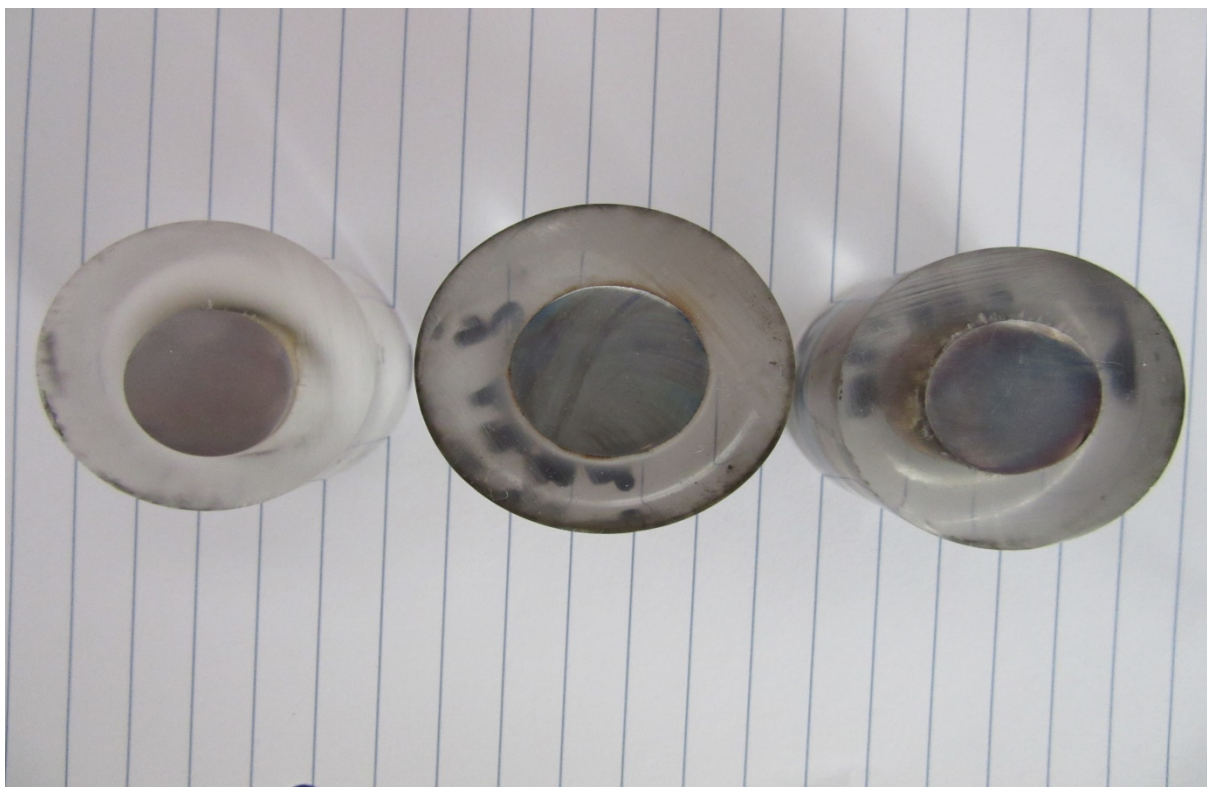
Slika 6.2. Radno mjesto Charpyevog bata

6.1. Analiza materijala prije toplinske obrade

Prije same toplinske obrade napravljene su tri epruvete za ispitivanje – slika 6.1.1. te je ujedno napravljena metalografija – slika 6.1.2.



Slika 6.1.1. Pokidane epruvete prije toplinske obrade



Slika 6.1.2. Pripremljeni uzorci za metalografiju

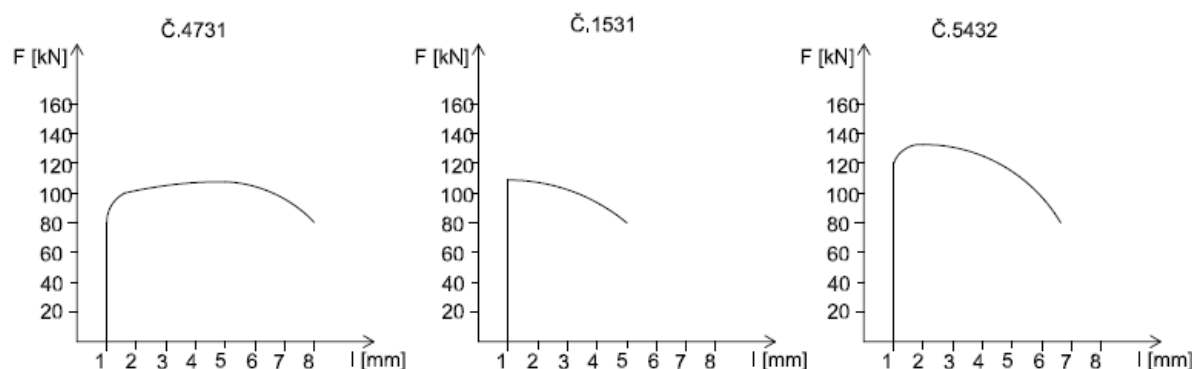
Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.1.1. za mehanička svojstva, a rezultati kemijskog sastava dobiveni metalografijom prikazani su u tablici 6.1.2.

Tablica 6.1.1. Mehanička svojstva materijala

Materijal	Granica razvlačenja Re [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²]	Izduženje A [%]	Kontrakcija Z [%]	Tvrdoća HB
Č. 1531	619,47	637,17	18	55	207,7 203,6 208,8
Č. 4732	596	628,3	22	68,5	197,7 205,7 209,8
Č. 5432	637,17	761,06	18,7	71	233,8 259 237,5

Tablica 6.1.2. Kemijski sastav materijala

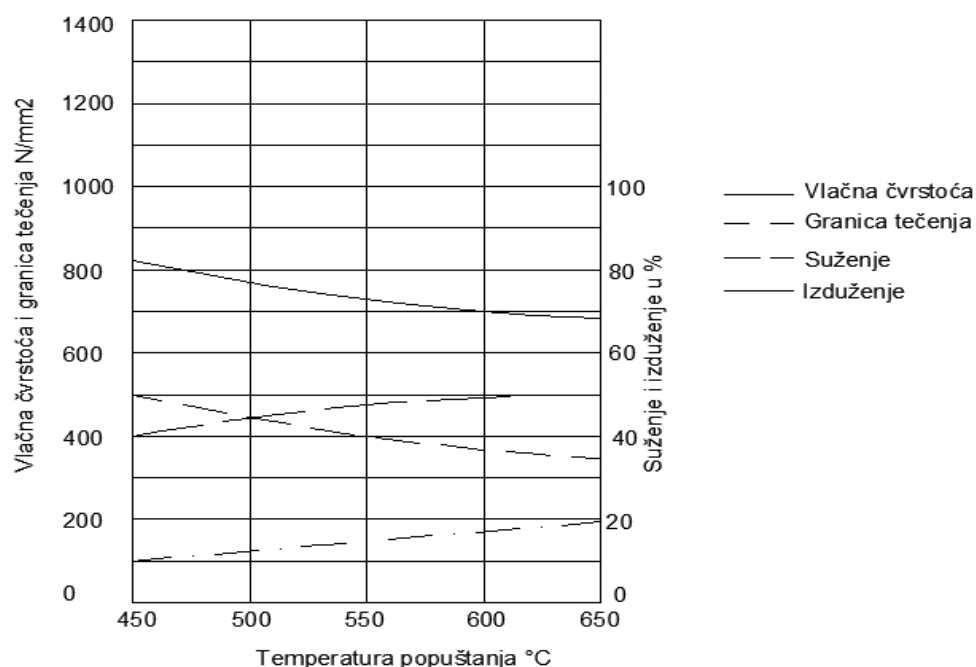
Kemijski element	Č. 1531	Č.4732	Č.5432
Fe	97,26	96,75	94,10
C	< 1,5	0,578	0,451
Si	0,215	0,220	0,165
Mn	0,733	0,746	0,562
P	0,005	< 0,002	0,012
S	0,020	0,028	0,014
Cr	0,936	1,06	2,17
Mo	0,141	0,178	0,359
Ni	0,148	0,117	1,88
Al	0,016	0,033	0,030
B	< 0,0005	0,0008	0,001
Co	< 0,001	0,012	0,011
Cu	< 0,001	0,119	0,044
Nb	< 0,002	0,015	0,021
Sn	< 0,001	0,006	0,006
Ti	< 0,001	0,005	0,004
V	< 0,001	0,008	0,015
W		0,011	0,059
Ca		0,0039	0,0025
Mg	< 0,002		
Zn	< 0,001		
Pb	< 0,002	< 0,001	< 0,001



Slika 6.1.3. Dijagram „sila – produljenje“ Č.1531, Č.4731, Č.5432 dobiven kidanjem prije TO.

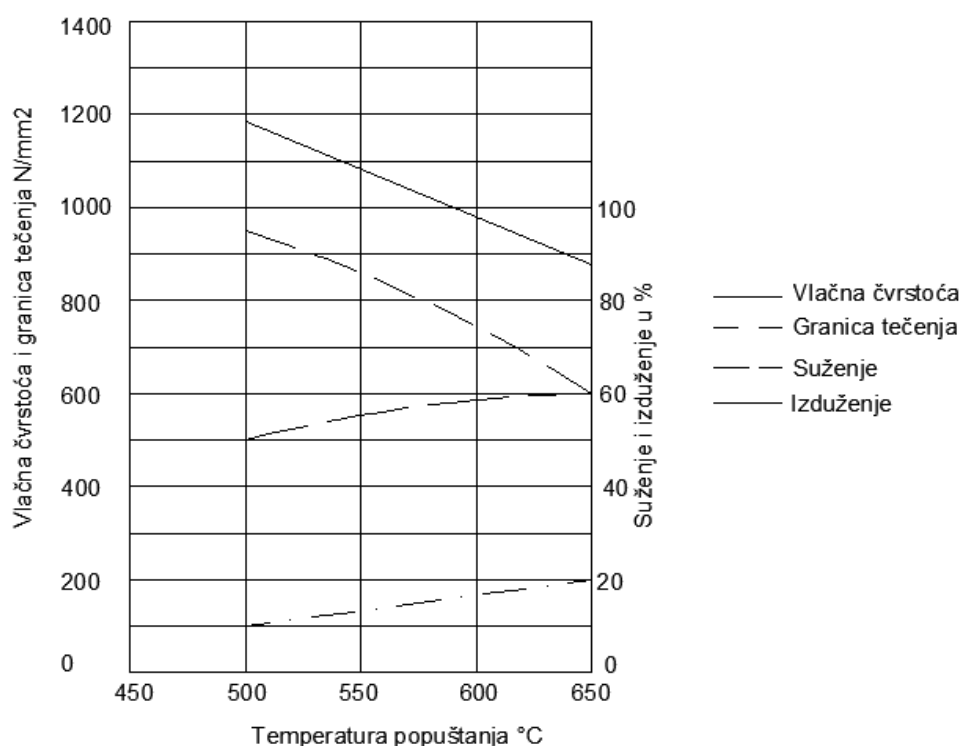
6.2. Preporučene vrijednosti

Preporučene vrijednosti u literaturi za Č.1531 (C45) navode da se popuštanje odvija pri temperaturama od 550 do 660°C i pri tim temperaturama granica razvlačenja iznosi 490 N/mm², vlačna čvrstoća od 650 do 800 N/mm², a istezljivost je 16%. U eksperimentu je vidljivo da su pri raznim temperaturama visokog popuštanja dobiveni drugačiji podaci, a u literaturi se navodi za temperaturu visokog popuštanja od 550°C granica razvlačenja iznosi 400 N/mm², vlačna čvrstoća 740 N/mm², dok je istezljivost 15%. Kod temperature od 570°C granica razvlačenja iznosi 390 N/mm², vlačna čvrstoća 720 N/mm², dok je istezljivost 16,5%. Kod temperature od 590°C granica razvlačenja je 380 N/mm², vlačna čvrstoća 710 N/mm², a istezljivost 17%. Kod temperature od 610°C granica razvlačenja iznosi 360 N/mm², vlačna čvrstoća 700 N/mm², a istezljivost je 17,5%. Tvrdća HB_{max} je 255. [1]



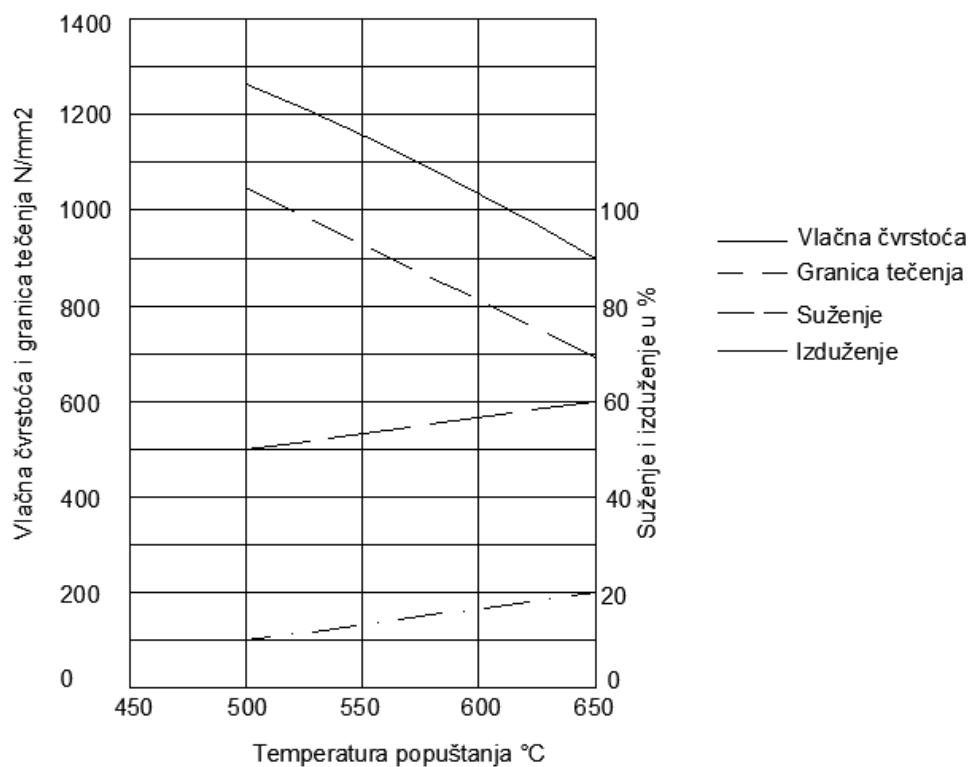
Slika 6.2.1. Dijagram vrijednosti utjecaja temp popuštanja na mehanička svojstva Č. 1531

Preporučene vrijednosti za čelik Č.4731 (42CrMo4) navode da se popuštanje odvija pri temperaturama od 540 do 680°C i pri tim temperaturama granica razvlačenja iznosi 900 N/mm², vlačna čvrstoća od 1000 do 1200 N/mm², a istezljivost je 11%. U eksperimentu je vidljivo da su pri raznim temperaturama visokog popuštanja dobiveni drugačiji podaci, a u literaturi se navodi za temperaturu visokog popuštanja od 550°C granica razvlačenja iznosi 860 N/mm², vlačna čvrstoća 1080 N/mm², dok je istezljivost 16,5%. Kod temperature od 570°C granica razvlačenja iznosi 830 N/mm², vlačna čvrstoća 1050 N/mm², dok je istezljivost 17%. Kod temperature od 590°C granica razvlačenja je 780 N/mm², vlačna čvrstoća 990 N/mm², a istezljivost 17,5%. Kod temperature od 610°C granica razvlačenja iznosi 720 N/mm², vlačna čvrstoća 950 N/mm², a istezljivost je 18%. Tvrdća HB_{max} je 255.[1]



Slika 6.2.2. Dijagram vrijednosti utjecaja temp popuštanja na mehanička svojstva Č. 4731

Preporučene vrijednosti za čelik Č.5432 (30CrNiMo8) navode da se popuštanje odvija pri temperaturama od 540 do 660°C i pri tim temperaturama granica razvlačenja iznosi 850 N/mm², vlačna čvrstoća od 1030 do 1230 N/mm², a istezljivost je 12%. U eksperimentu je vidljivo da su pri raznim temperaturama visokog popuštanja dobiveni drugačiji podaci, a u literaturi se navodi za temperaturu visokog popuštanja od 550°C granica razvlačenja iznosi 930 N/mm², vlačna čvrstoća 1150 N/mm², dok je istezljivost 13%. Kod temperature od 570°C granica razvlačenja iznosi 890 N/mm², vlačna čvrstoća 1120 N/mm², dok je istezljivost 14%. Kod temperature od 590°C granica razvlačenja je 830 N/mm², vlačna čvrstoća 1050 N/mm², a istezljivost 16%. Kod temperature od 610°C granica razvlačenja iznosi 790 N/mm², vlačna čvrstoća 1000 N/mm², a istezljivost je 17%. Tvrdća HB_{max} je 248.[1]



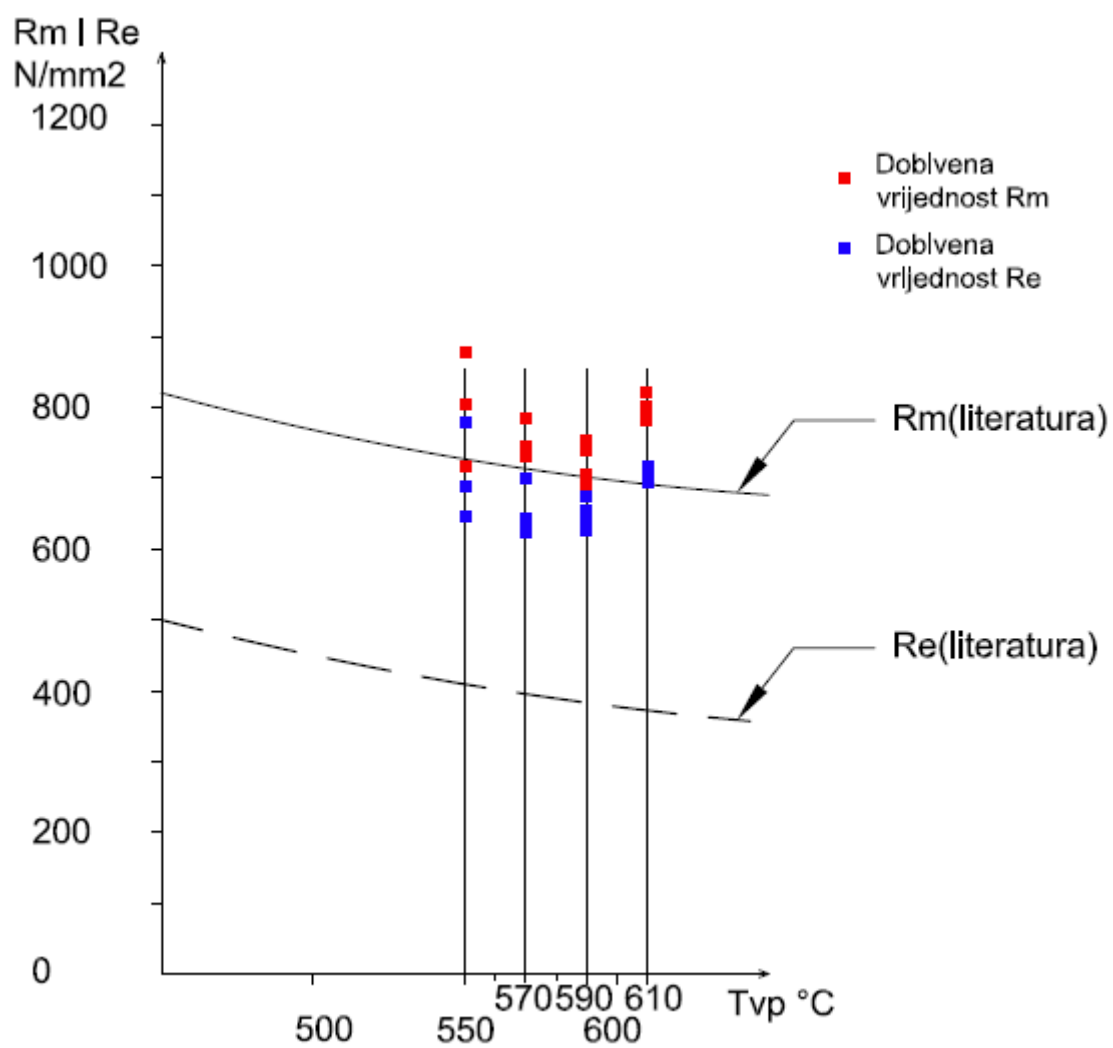
Slika 6.2.3. Dijagram vrijednosti utjecaja temp popuštanja na mehanička svojstva Č. 5432

7. Analiza rezultata

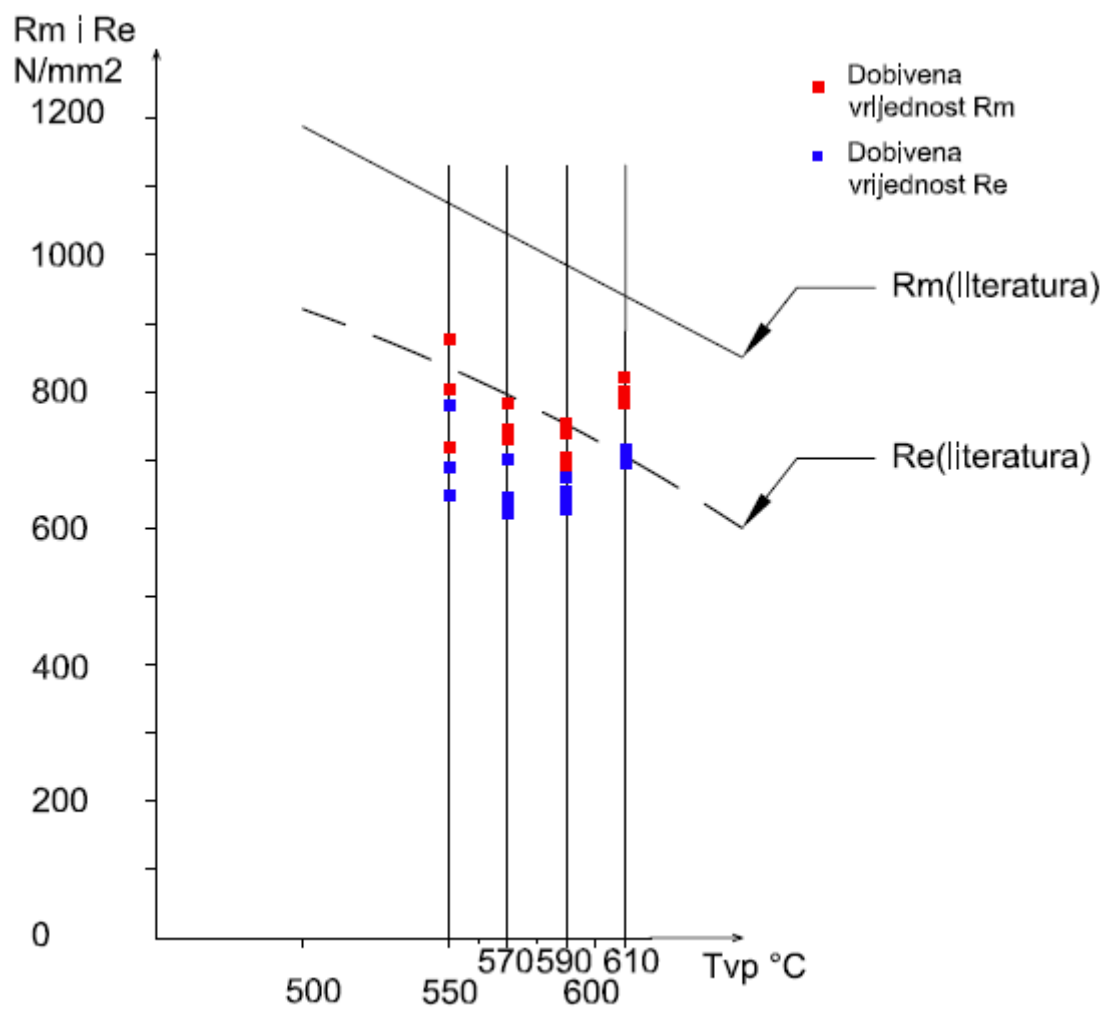
Statičkim vlačnim pokusom nakon toplinske obrade utvrđene su sljedeće vrijednosti u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Mehanička svojstva nakon toplinske obrade poboljšavanja.

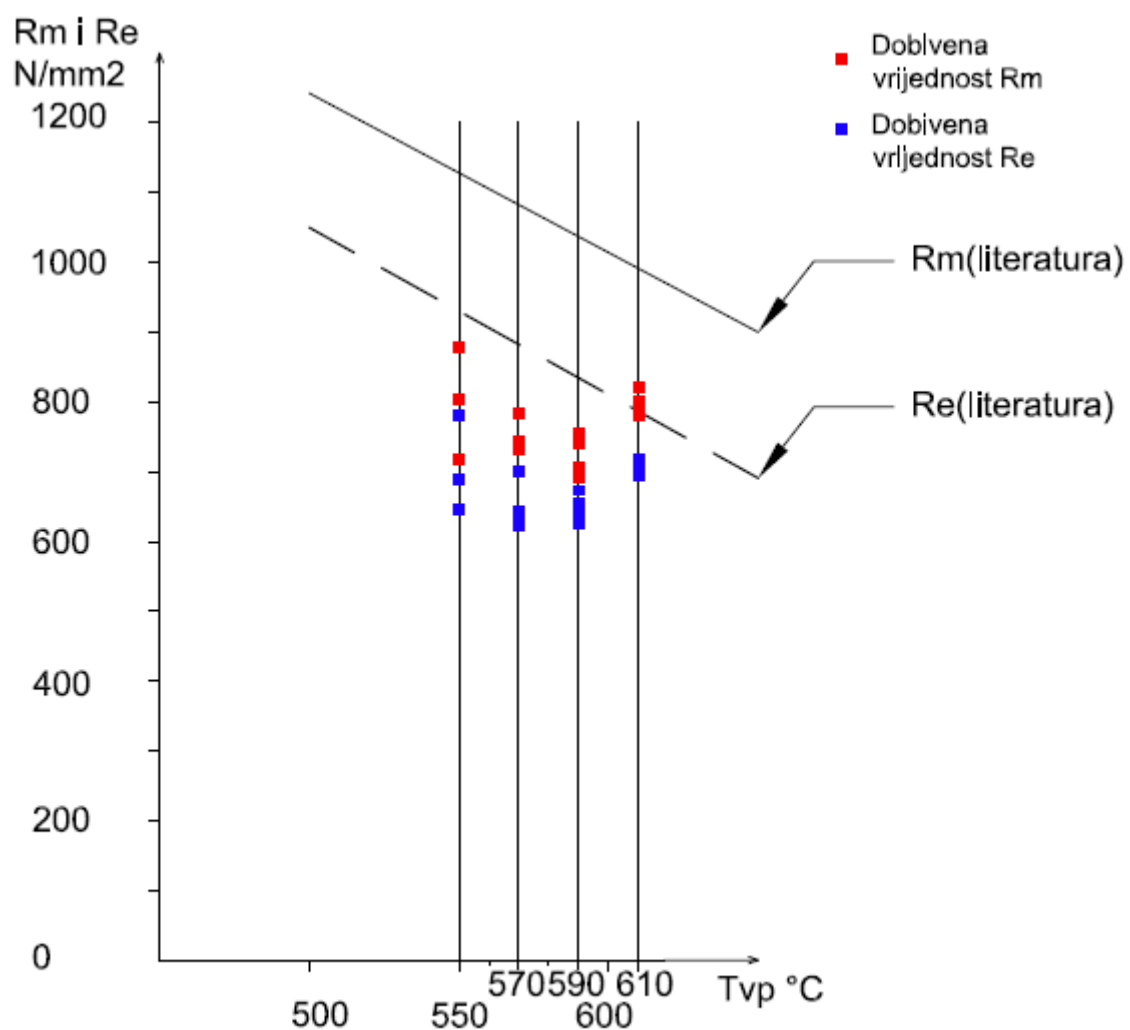
Test oznaka	Granica razvlačenja Re [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²]	Izduženje A [%]	Kontrakcija Z [%]
1 - 1	641,6	725,66	6,2	71,9
1 – 2	694,7	805,31	1,7	63,7
1 – 3	787,61	884,9	2,81	62,88
2 – 1	619,46	730	3,1	61,44
2 – 2	632,74	738,93	5,3	61,54
2 – 3	623,89	721,23	4,6	63,18
2 – 4	707,96	787,61	5,6	69,7
3 – 1	681,41	734,51	4	68,5
3 – 2	637,17	694,7	4,5	62,7
3 – 3	646	703,54	5,6	64,7
3 – 4	672,56	752,21	4,9	70,2
4 – 1	699,1	796,46	1,35	62,4
4 – 2	725,6	827,4	0,085	67,6
4 – 3	707,96	792,03	1	72
4 – 4	703,53	800,88	2,1	71



Slika 7.1. Dijagram temperature visokog popuštanja i dobivenih vrijednosti vlačne čvrstoće Č.1531



Slika 7.2. Dijagram temperature visokog popuštanja i dobivenih vrijednosti vlačne čvrstoće Č.4731



Slika 7.3. Dijagram temperature visokog popuštanja i dobivenih vrijednosti vlačne čvrstoće Č.5432

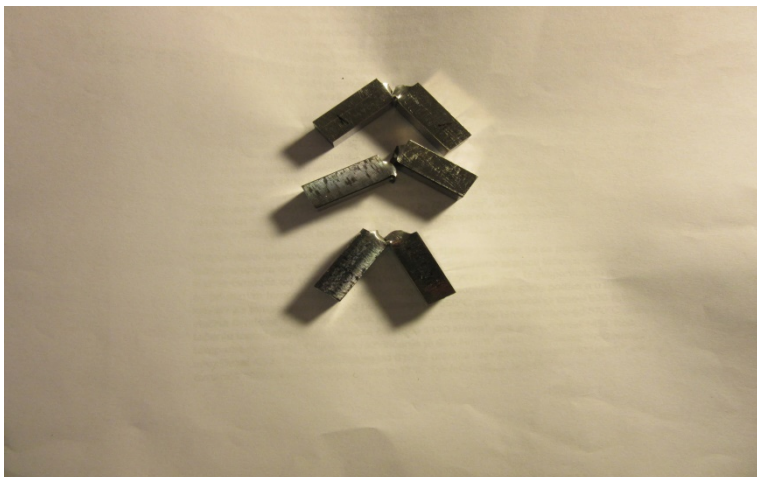


Slika 7.4. Pokidane epruvete poslije toplinske obrade.

Ispitivanje udarnog rada loma (žilavosti) metodom Charpy provedeno je s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja – tablica 7.2.

Tablica 7.2. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma (žilavosti)

Materijal	Udarni rad loma KU [J] 20°C
Č.1531	149 J
Č.4731	90 J
Č.5432	128 J



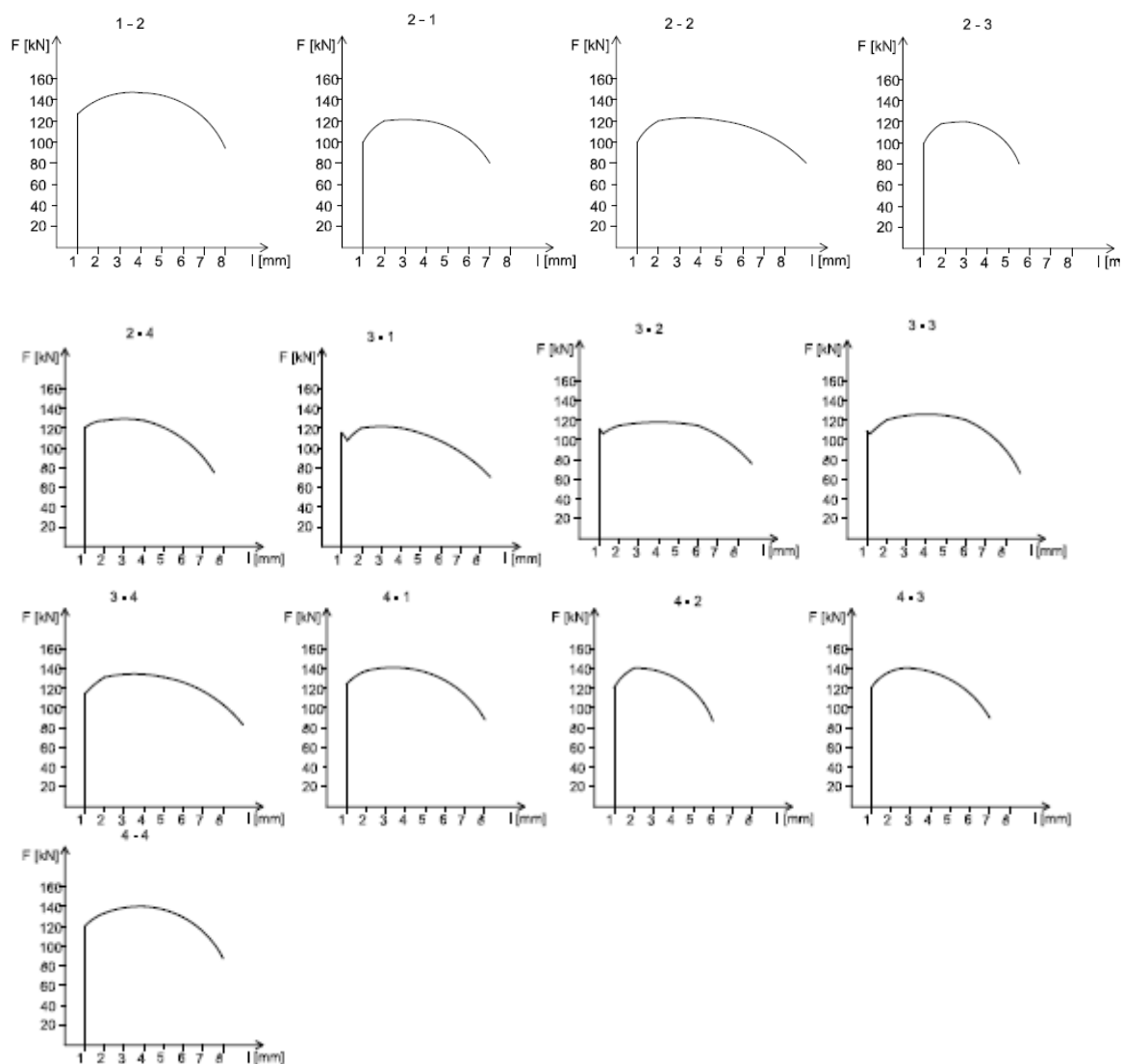
Slika 7.5. Pokidane epruvete na Charpy - evom batu

Veći iznos udarnog rada loma ukazuje na žilavi materijal, a manji na krhkost.

Ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom po Brinell-u i utvrđeni su sljedeći rezultati – tablica 7.3.

Tablica 7.3. Rezultati ispitivanja metodom po Brinell-u

Čelik	Probni uzorak 1	Probni uzorak 2	Probni uzorak 3	Probni uzorak 4
Č.1531	300,4 HB	246,6 HB	246,6 HB	250,7 HB
Č.4731	298,7 HB	250,7 HB	236,3 HB	250,7 HB
Č.5432	298,7 HB	250,7 HB	236,3 HB	250,7 HB



Slika 7.6. Dijagrami „sila - produljenje“ nakon poboljšavanja

8. Zaključak

Analizom dobivenih rezultata statičkim vlačnim pokusom i utvrđivanjem žilavosti prema metodi Charpy i tvrdoći prema Brinell-u utvrđeno je da su optimalni parametri oni koji najviše odgovaraju parametrima preporučenim i utvrđenim od samih proizvođača i u stručnoj literaturi prema normama.

Eksperimentalnim dijelom odrađena su ispitivanja mehaničkih svojstava prije toplinske obrade i poslije toplinske obrade koncentrirajući se na četiri različite temperature austenitizacije, a isto tako i na četiri različite temperature visokog popuštanja. Ovakim pristupom smo postigli dobivanje različitog utjecaja temperature na toplinsku obradu i donošenje odluke o optimalnoj toplinskoj obradi.

Prema slici 7.1. – dijagram dobivenih rezultata za vlačnu čvrstoću zaključujem da je kompletan proces poboljšavanja izveden tehnički korektno i prema pravilima struke jer nam se rezultati ispitivanja na svim temperaturama visokog popuštanja poklapaju sa preporučenim vrijednostima iz literatura. S time da se vrijednosti 1 – 1, 2 – 1, 2 – 2, 2 – 3, 3 – 1, 3 – 2, 3 – 3 najpreciznije približavaju preporučenim vrijednostima, dok ostale vrijednosti 1 – 2, 1 – 3, 2 – 4, 3 – 4, 4 – 1, 4 – 2, 4 – 3, 4 – 4 odbacujemo kao neprecizne. Vidljivo je kako temperatura austenitizacije utječe na točnost vrijednosti i njezinim promjenama možemo preciznije ili ne preciznije utjecati na vlačnu čvrstoću. Također su vidljive i vrijednosti granice razvlačenja i njihova odstupanja.

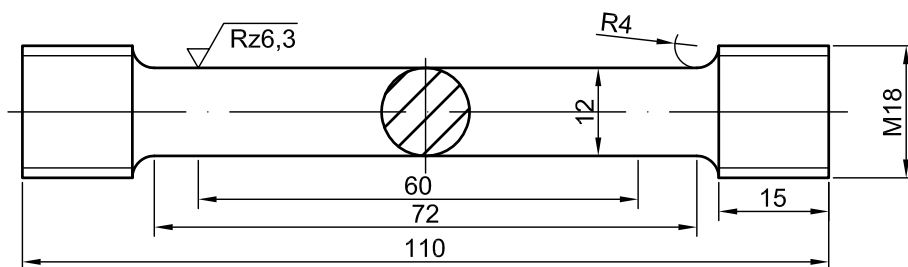
Prema slici 7.2. – dijagram dobivenih vrijednosti za vlačnu čvrstoću zaključujem kako dobiveni rezultat eksperimentalnim radom pokazuje znatna odstupanja od teorijskih zadanih i valjalo bi ponoviti eksperiment na više uzoraka sa svim toplinskim obradama. Ove podatke zato ne možemo promatrati kao relevantne i sumlja se na zamjenu uzoraka tokom obrade u radionici i to Č.4731 sa Č.1531.

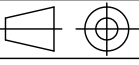
Prema slici 7.3. – dijagram dobivenih vrijednosti za vlačnu čvrstoću zaključujem kako dobiveni rezultat eksperimentalnim radom pokazuje znatna odstupanja od teorijskih zadanih i prema tome se ne može uzeti kao relevantni te bi valjalo ponoviti eksperiment na više uzoraka sa svim toplinskim obradama. Sumlja je opet na zamjenu uzoraka tokom obrade u radionici i to Č.5432 sa Č.1531.

Ovim završnim radom prikazano je kako odabir različite temperature austenitizacije i temperature visokog popuštanja može utjecati na konačne vrijednosti za zadane čelike a time i na kvalitetu i dugotrajnost strojnih dijelova u kojima se koriste. Ovisno o potrebama i zadanim parametrima potrebno je precizno odrediti temperature jer se lošim odabirom mogu prouzročiti veliki štete kako financijskih tako i mehaničkih prilika. Zato je potrebno obratiti posebnu pozornost kako bi se smanjile mogućnosti pogreške te ponoviti eksperiment više puta i sa više uzoraka. Tako smanjujemo grešku na najmanju moguću razinu a podižemo kvalitetu poboljšavanja čelika na zahtjevanu razinu.

9. Literatura

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tisak „Kratis“ Zagreb, 1997.
- [2] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala Intergrafika – TTŽ Zagreb, 2006,
- [3] Stupnišek, M., Cajner, F.: Osnove toplinske obrade metala, FSB Zagreb, 2001.
- [4] Kožuh, S.: Specijalni čelici – skripta, Sisak, 2010.
- [5]https://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/download/ac071ab5e9d8bc7afeb3dd1095e138c1.pdf
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Brinell_scale



Broj naziva - code	Projektirao	09.7.2015	Ime i prezime	Goran Haviđić	Potpis	
	Razradio	09.7.2015	Goran Haviđić			
	Crtao	09.7.2015	Goran Haviđić			
	Pregledao					
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:		
	DIN 50 125 B 12x60			R. N. broj:		
	Napomena:					
	Materijal: Č.1531			Masa:		
				Naziv: Epruveta za statički		
	Mjerilo originala 1:1			Pozicija: Format: A4		
				Listova: 1		
				List: 1		