

POBOLJŠAVANJE ČELIKA

Gagula, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:128828>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-07**



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 REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

Stručni studij Strojарstva

Ivana Gagula

POBOLJŠAVANJE ČELIKA

Završni rad

Karlovac, 2020.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojарstva

Ivana Gagula

POBOLJŠAVANJE ČELIKA

Završni rad

Mentor:

Tomislav Božić, dipl. ing. stroj.

Karlovac, 2020.

| | | | |
|---|----------------------------|---------------------------|--|
| Ime i prezime | Ivana Gagula | | |
| OIB / JMBG | | | |
| Adresa | | | |
| Tel. / Mob./e-mail | | | |
| Matični broj studenta | 0110614001 | | |
| JMBAG | | | |
| Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija) | X preddiplomski | specijalistički diplomski | |
| Naziv studija | Stručni studij Strojarstva | | |
| Godina upisa | 2014. | | |
| Datum podnošenja molbe | | | |
| Vlastoručni potpis studenta/studentice | | | |

| | | | |
|--|--|------------------------------------|--|
| Naslov teme na hrvatskom: | | Poboljšavanje čelika | |
| Naslov teme na engleskom: | | | |
| <p>Opis zadatka:</p> <p>Završni rad sastoji se iz dva dijela, teoretskog i eksperimentalnog. U teoretskom dijelu rada sukladno raspoloživoj literaturi obraditi postupak poboljšavanja čelika kao i vrste čelika namjenjenih za tu vrstu Toplinske obrade. U eksperimentalnom (praktičnom) dijelu rada analizirajući dijagrame visokog popuštanja iz faze poboljšavanja čelika za tri različite vrste čelika po kemijskom sastavu(Č.1531; Č.4732 i Č.5431) odrediti pod kojim uvjetima sve tri vrste čelika možemo istovremeno tretirati postupkom poboljšavanja kroz prethodno zadanu temperaturu visokog popuštanja. Analizirati rezultate ispitivanja i po potrebi predložiti sve eventualne korektivne aktivnosti do zadovoljavanja zadanih uvjeta prije početka postupka.</p> <p>Rad napraviti sukladno pravilniku o izradi završnih radova Vuka Karlovac.</p> | | | |
| Mentor: | | Predsjednik Ispitnog povjerenstva: | |

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad na temu „Poboljšavanje čelika“ izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija te navedenu stručnu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Tomislavu Božiću, dipl. ing. stroj. na uloženom vremenu i trudu te na pribavljanju dodatne literature, ali i na održavanju dodatnih satova i nesebičnome prenošenju svojega znanja.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i svima onima koji su mi na bilo koji način pružili podršku i motivaciju tijekom studiranja.

Ivana Gagula

Karlovac, 21.9.2020.

Naslov: Poboljšavanje čelika

Sažetak

U ovom završnom radu ispitan je utjecaj toplinske obrade poboljšavanja na svojstva konstrukcijskih čelika Č.1531, Č.4732 i Č.5431. Iz dobivenih rezultata se određuju optimalni parametri.

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

Eksperimentalnim dijelom obuhvaćena je priprema radnih komada te njihova toplinska obrada poboljšavanja. Izračunom su dobivene vrijednosti koje su prikazane u grafičkim prikazima.

Analizom rezultata dobivenih izračunima doneseni su zaključci o određivanju optimalnih parametara poboljšavanja konstrukcijskih čelika.

Ključne riječi:

Optimalni parametri poboljšavanja, toplinska obrada poboljšavanja, Č.1531, Č.4732, Č.5431

Title: Steel improvement

Summary

This thesis studies the influence of tempering on the performance of carbon steel Č.1531, Č.4732 and Č.5431. The optimal parameters are determined from the obtained results.

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

Experimental part includes the preparation of test samples and their heat treatment of improving. Values shown in the graphical representations were obtained by calculations.

Optimal steel tempering parameters were determined by analyzing the results obtained from calculations.

Key words:

Optimal parameters of steel improvement, steel improvement, C45E, 42CrMo4, 34CrNiMo6

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 5 |
| 2. OPĆA SVOJSTVA ČELIKA..... | 6 |
| 2.1 Fazne pretvorbe u čeliku..... | 7 |
| 2.2 Djelovanje primjesa u čeliku..... | 10 |
| 2.3 Djelovanje nemetalnih uključaka..... | 12 |
| 2.4 Djelovanje legirnih elemenata..... | 13 |
| 3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI..... | 17 |
| 3.1 ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE..... | 19 |
| 3.2 VRSTE ČELIKA..... | 21 |
| 3.3. Karakteristike čelika za poboljšavanje..... | 24 |
| 3.3.1 Nelegirani čelici..... | 24 |
| 3.3.2 Legirani čelici za poboljšavanje..... | 25 |
| 3.4 Mehanička svojstva poboljšanog čelika..... | 28 |
| 4. TOPLINSKA OBRADA I POBOLJŠANJA..... | 29 |
| 4.1 POBOLJŠAVANJE..... | 32 |
| 4.1.1 Postupak običnog poboljšanja..... | 34 |
| 4.1.2 Postupak izotermičkog poboljšanja..... | 36 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO..... | 40 |
| 5.1 PLAN EKSPERIMENTALNOG DIJELA..... | 40 |
| 6. ANALIZA REZLUTATA..... | 51 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 53 |
| POPIS OZNAKA..... | 54 |
| LITERATURA..... | 55 |
| POPIS SLIKA..... | 56 |
| POPIS TABLICA..... | 57 |

1. UVOD

Od davnina su ljudi koristili različite materijale i u prirodi se snalazili sa onime što su imali. Prve civilizacije su koristile drvo, kamen, kožu, krzno i slično. Kasnije, kako je vrijeme prolazilo, vještine su se razvijale, a potrebe za novim materijalima su stalno rasle. Kako bi čovjek opstao, morao je početi koristiti nove materijale. Za početak su to bili materijali za izradu oruđa i oružja koja je čovjek morao razviti kako bi preživio. Kombiniranjem različitih materijala čovjek se razvijao pa možemo reći da su materijali oduvijek uz čovjeka.

Danas postoji velik izbor materijala, a odabiru se oni koji pokazuju najbolja svojstva za ono što je potrebno. Kako se razvijalo čovječanstvo, razvijali su se i zahtjevi svojstava materijala kao što su: bolja funkcionalnost, tvrdoća, čvrstoća, nosivost, trajnost i druge. Tako su ljudi stalno morali pronalaziti nove materijale.

Svaki konstruktor ima zadatak, uz najbolju cijenu, osmisliti što kvalitetniji proizvod sa što boljim mehaničkim svojstvima. Bolja svojstva čelika mogu se postići toplinskom obradom, što ću i opisati u ovome radu.

U ovom radu se detaljnije bavi čelicima za poboljšavanje, o kojima je u nastavku rečeno nešto više. Posebnu pozornost je na tri zadana čelika, različitog kemijskog sastava, kojima je obavljen eksperimentalni dio završnog rada.

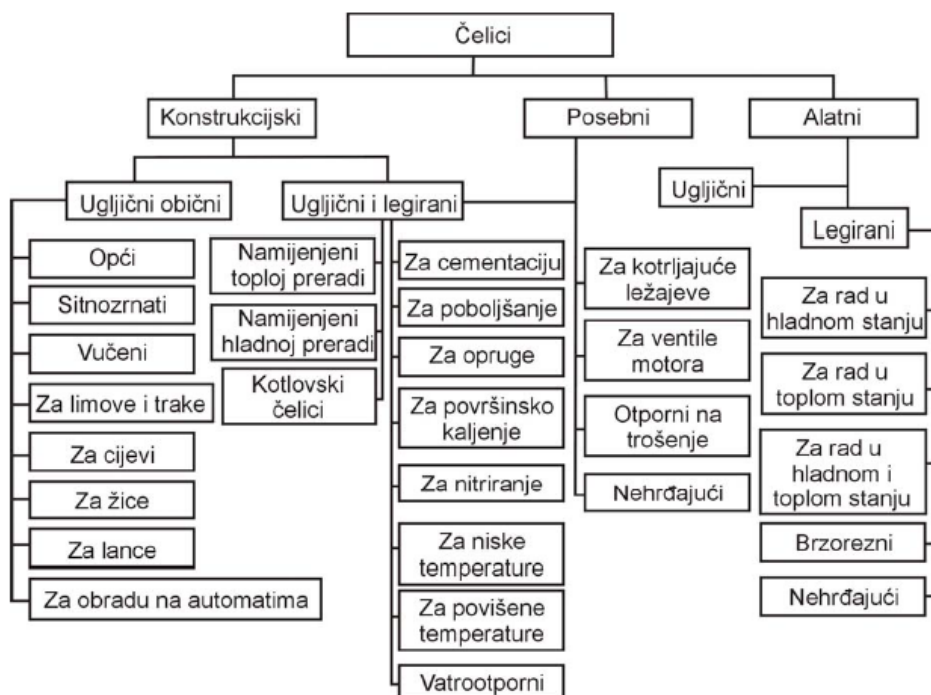
U prvom dijelu rada je pisano nešto više o čelicima. Nakon toga su objašnjeni konstrukcijski čelici, a dodatno čelici za poboljšavanje. Zatim je objašnjena toplinska obrada kojom se čelici i poboljšavaju.

2. OPĆA SVOJSTVA ČELIKA

Prava, točna i jedna jedina definicija čelika ne postoji. Razne literature nude i razne definicije, ali sve se svode na to da je čelik željezni materijal pogodan za toplu obradu. Čelik se također može nazvati i metastabilno kristaliziranom legurom željeza i ugljika (do 2%). Također, može sadržavati pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostali) sa ili bez dodatak ostalih legirajućih elemenata. Svi ti elementi uvjetuju konačnim svojstvima čelika. Neki poboljšavaju svojstva, a neki pogoršavaju i nisu toliko poželjni. Ugljik svojim udjelom utječe na mikrostrukturu čelika, a time i na njegova svojstva.

Porastom ili smanjenjem ugljika utječe se na tvrdoću, granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, istežljivost i udarni rad loma. Ugljik isto tako utječe i na obradu, porastom raste zakaljivost, a opada sposobnost za plastičnu deformaciju i zavarljivost.

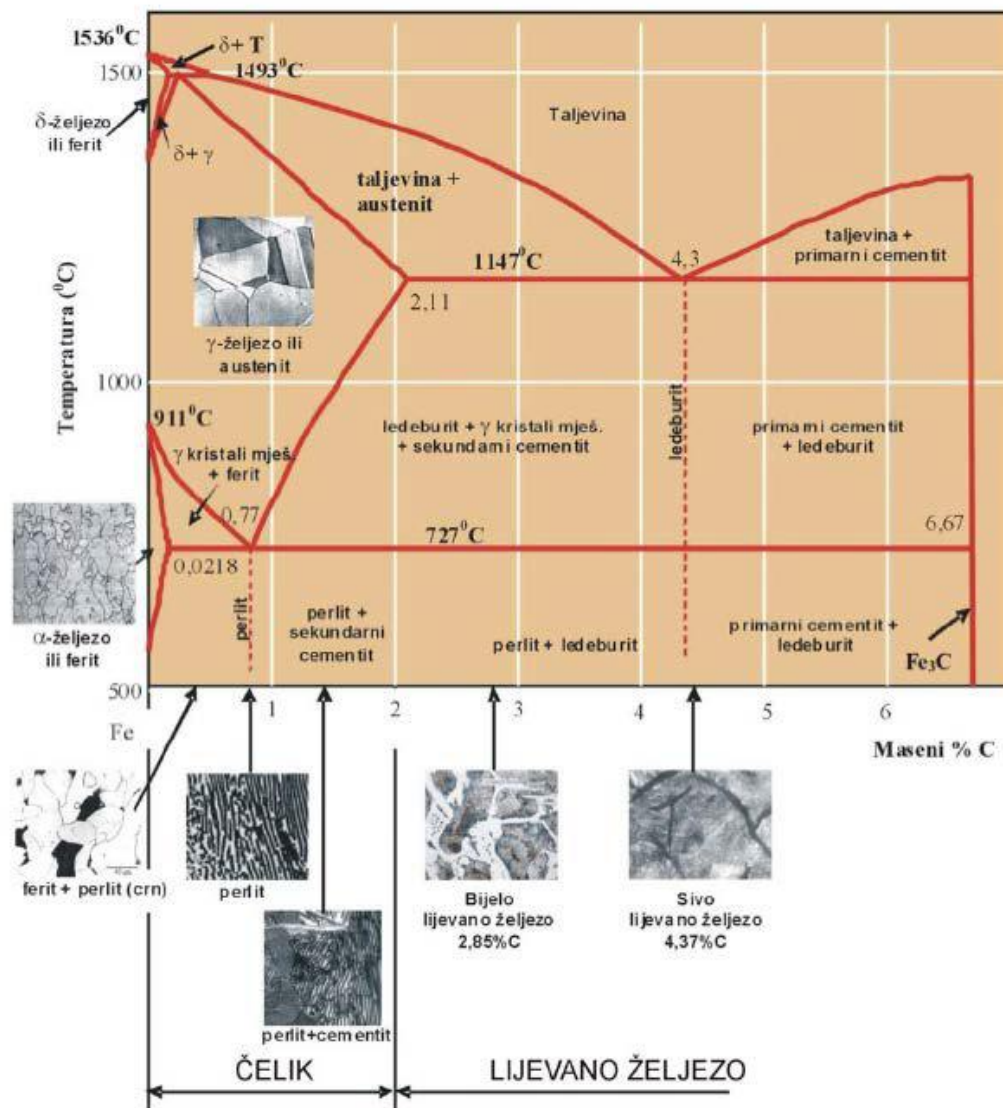
Čelici su postali najvažniji tehnički materijali u proizvodnji i primjeni. Proizvodnja čelika na svjetskoj razni se popela na 65% od ukupne proizvodnje tehničkih materijala.



Slika 1. Opća podjela čelika prema namjeni [1]

2.1 Fazne pretvorbe u čeliku

Jedan od najvažnijih dijagrama u tehničkoj praksi je dijagram stanja željezo-uglik za metastabilnu kristalizaciju. Dijagramima se određuje peritektički, eutektički i eutektoidni dio (slika 2). Svaki dio daje neka svoja svojstva. Ti dijelovi ovise o sastavu i temperaturi jer atomi ugljika ulaze u rešetku željeza tvoreći intersticijske kristale mješance (α , γ , δ) ili kristale grafita. Mikrostruktura čelika se sastoji od sljedećih faza ili struktura: ferit, austenit, cementit, perlit, bainit i martenzit.



Slika 2. Dijagram stanja željezo – ugljik [1]

δ – ferit predstavlja krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza. Ferit je nemagnetičan. 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. On ima najmanji specifični volumen i vrlo je žilav, a 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. Javlja se pri $\approx 723^{\circ}\text{C}$ uz 0,025% ugljika.

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

Perlit predstavlja eutektoidnu smjesu ferita i cementita. Nastaje pri $\approx 723^{\circ}\text{C}$ uz 0,8% ugljika. Vrlo je važno polagano hlađenje. Osnova mu je bijeli ferit (najčešće) i tanke pločice cementita.

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

Bainit predstavlja međustrukturu nastalu od ferita i cementita. Za razliku od perlita, stvaraju se samo lamele ferita na čijim se granicama izdvaja cementit u obliku sitnih kuglastih čestica. Kako bi se postigla ovakva struktura, čelik je potrebno hladiti brzinom između temperature stvaranja perlita i martenzita.

Martenzit predstavlja prezasićenu krutu otopinu ugljika u bolumno centriranoj tetragonalnoj rešetci (BCT). Javlja se u obliku nakupina igličastih kristala koji se sijeku pod određenim kutevima. Nastaje kada se čelik austenitne mikrostrukture ohladi na dovoljno nisku temperaturu. Martenzit je specifičan po nestabilnosti, tvrdoći i krhkosti. Daje veliku tvrdoću kaljenja.

Kao što se vidi iz prikazanog, najvažnije reakcije čelika odnose se na transformaciju iz austenitnog područja pri različitim brzinama hlađenja. Različiti su načini hlađenja: na zraku, u ulju, u solnoj kupci, u peći i slično. Oni daju različite brzine hlađenja. Fazni dijagram može predvidjeti vrlo polagano hlađenje. Za veće brzine hlađenja nije dostatan ovaj dijagram kako bi se pretpostavile fazne transformacije i mikrostrukturu jer se većim brzinama ne daje dovoljno vremena za završetak difuzije. 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. Pri toj temperaturi dolazi do reakcije i nastaje perlitna mikrostruktura. Tu se vide lamele ferita koje su deblje od lamela cementita.

Sporo hlađenje podeutektoidnog čelika (0,4%C) na temperaturi iznad 800°C ima austenitnu mikrostrukturu, a malo iznad 723°C sastoji se od ferita i austenita. Na temperaturi ispod 723°C austenit se raspada u perlit. Tada se mikrostruktura sastoji od ferita i perlita. Bitno za naglasiti je da 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. Pri temperaturi ispod 723°C austenit se raspada u perlit, pa se mikrostruktura sastoji od perlita i cementita.

2.2 Djelovanje primjese u čeliku

Primjese unutar čelika odlučuju o njegovoj kvaliteti time što utječu na različita svojstva. Te primjese su kisik, dušik, vodik, fosfor, sumpor te nemetalni uključci sulfidnog, oksidnog ili silikatnog tipa.

Prisutne su u svakom čeliku, a cilj je njihove masene udjele svesti na minimum.

Fosfor

Fosfor (P) je nepoželjna primjesa u čeliku i udio bi joj trebao biti što manji (ispod 0,06%). Sa željezom u čeliku stvara supstitucijski kristal mješanac, a tijekom skrućivanja, zbog male brzine difuzije, dovodi do pojave primarnih segregacija. Segregacije su štetne nehomogenosti strukture. Ukoliko je difuzija izrazito spora, uzrokovat će nemogućnost njegove jednolike raspodjele. Nakon prolaska intervala skrućivanja, primarni dendritni kristali su siromašni fosforom i legirnim elementima, a ostatak taline sadrži fosfor i glavninu nemetalnih uključaka.

Toplim oblikovanjem se trakasto izdužuje (tzv. primarna trakavost) dendritna lijevana mikrostruktura i vrlo se teško otklanja.

Povisivanjem masenog udjela fosfora pojavljuje se krhkost u hladnom stanju. To prikazuje tablica 1.

Pri većem sadržaju ugljika i višoj temperaturi austenitizacije, krhkost je izraženija.

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

| 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 |

Tablica 1. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika [1]

Kisik

Povišeni maseni udio kisika često se nalazi kod niskougličnih čelik. Kod njih to izaziva pojavu okida željeza (FeO). Ti oksidi uzrokuju „crveni lom“. Nastanak te pojave se može sprječiti uklanjanjem kisika iz taline dezoksidacijom čelika. Pri tome nastaju oksidi Al_2O_3 i SiO_2 koji su tvrdi i kuglastog oblika. Oni pri kasnijoj obradi mogu dovesti do problema. Prisutnost kisika u čelicima povisuje krhkost.

Vodik

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

Dušik

Dušik je netopljiv u rešetki željeza. Brzim hlađenjem ostaje zarobljen u rešetki i potrebno ga je izvući iz nje. Izvlači se dodavanjem elemenata (Al, Ti, Nb...) koji imaju veći afinitet prema dušiku od željeza pa nastaju nitridi. Ukoliko se ne provede izvlačenje, doći će do pojave „starenja“. Rezultat toga je povišena čvrstoća, a smanjena žilavost.

Maseni udio mu je od 0,01% do 0,03% te povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, a smanjuje deformabilnost i udarni rad loma. Kvaliteta čelika se mjeri upravo masenim udjelom dušika.

Sumpor

Sumpor se dobiva iz rude i produkata izgaranja (SO_2). U čelicima ga ima od 0,05% do 0,06%.

Sa željezom tvori nepoželjni sulfid FeS koji uzrokuje pojave „crvenog“ i „bijelog“ loma pa je odgovoran za segregaciju. Crveni lom se javlja na temperaturama iznad 1000°C jer se FeS rastavlja pri 985°C , a dovodi do smanjenja žilavosti. Radi toga se čelici sa višim sadržajem sumpora ne deformitaju u toplom stanju. Ovakav štetan utjecaj se rješava dodavanjem mangana koji tvori sulfid MnS i ima znatno višu temperaturu taljenja (1610°C). Također se dobro plastično oblikuje (hladno i toplo).

U nekim slučajevima se sumpor namjerno dodaje (do 0,3%). To su slučajevi čelika namijenjenih obradi odvajanjem čestica jer sumpor snižava trenje između obratka i alatne oštrice te pospješuje lakše lomljenje strugotine.

2.3 Djelovanje nemetalnih uključaka

Upravo nemetalni uključci u čeliku određuju njegovo svojstvo oblikovljivosti i otpornosti na lom. Uključci mogu biti oksidne, sulfidne ili silikatne vrste i najčešće se radi o kristalima mješancima ili eutekticima. Rjeđe ih se može naći kao čiste kemijske spojeve kao što su MnO, MnS ili SiO_2 . Prema obliku se dijele na okrugle, tvrde ili poligonalne. Poligonalni su često tvrdi, a izduženi su često oblikovljivi.

Nemetalni uključci svojom količinom, vrstom i raspodjelo u čeliku utječu na tvrdoću ili krhkost, smanjuju žilavost i dovode do anizotropnosti svojstava čvrstoće. Kada dolazi do vanjskog opterećenja, u blizini nemetalnih uključaka, povećava se koncentracija naprezanja te se odvajaju fazne granice matice od uključaka. Njih se može ukloniti tako da čeliku dodajemo cirkonij (Zr), cerij (Ce) ili titanij (Ti).

2.4 Djelovanje legirnih elemenata

Čelik mijenja svoja svojstva kada mu se dodaju drugi elementi. To se naziva legiranje. Da bi se čelik mogao nazivati legirnim, mora sadržavati jedan ili više legirnih elemenata sa određenim masenim udjelima kako je vidljivo u tablici 2.

Čelik se najčešće legira sa kromom, niklom, manganom, silicijem, volframom, vanadijem, molibdenom, titanom, aluminijem i kobaltom. Oni se pojavljuju kao spojevi s nemetalnim uključcima, kao spojevi sa željezom ili međusobni (karbidi) ili se rastvaraju u BCC ili FCC rešetci.

Legiranje se radi kako bi se dobila željena svojstva ili kombinacija svojstava (mehanička svojstva, otpornost na koroziju, otpornost na trošenje, prokaljivost). Legirani čelici se dijele na niskolegirane (do 5% udjela legirnog elementa) i na visokolegirane (preko 5% udjela legirnog elementa).

| 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%.

Tablica 2. Granični maseni udjeli elemenata (EN 10020) [1]

Ugljik

Ugljik je sastavni dio čelika i ima najveći utjecaj na njegova svojstva. Također se i ne smatra legirajućim elementom. Ugljik smanjuje duktilnost i žilavost. Njime se određuje čvrstoća i granica razvlačenja. Bitna odrednica ugljika je osiguravanje zakaljivosti (mogućnost kaljenja čelika) i prokaljivost (dubuna zakaljenog sloja) nelegiranih i legiranih čelika. Jako prokaljiv legirani čelik može se zakaliti i na debljim presjecima dok kod samo ugljičnih čelika je do debljine 16mm.

Aluminij

Koristi se kao sredstvo za deoksidaciju čime čelik postaje manje osjetljiv na starenje (vezanjem za dušik) i pospješuje stvaranje sitnijih zrna. Predstavlja važan legirni element za nitriranje jer ima svojstvo stvaranja nitrida. Također reagira sa niklom i titanom stvarjući intermetalne spojeve (Ni_3Al i Ni_3Ti). Aluminij jako sužava austenitno područje, ali ne doprinosi poboljšanju mehaničkih svojstava čelika.

Krom

Krom jako lako stvara karbide i zato je jedan od značajnijih legirnih elemenata. Dodaje se čelicima za izradu reznih alata jer karbidi povišuju otpornost na pritisak i na abrazijsko trošenje. Time se povećava izdržljivost i trajnost oštrice alata.

Krom omogućava da se čelici nakon austenitiziranja hlade u ulju ili čak na zraku jer im povišuje prokaljivost i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita (M_s). Udarni rad loma je manji nego kod ostalih čelika i utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja. To se izbjegava legiranjem sa molibdenom.

Molibden

Molibden najčešće dolazi u kombinaciji sa drugim legirnim elementima. On povećava prokaljivost i čvrstoću čelika. Molibden sprječava pojavu visokotemperaturne krhkosti i popuštanja. Također, utječe na povišenje granice razvlačenja, vlačne čvrstoe i granice puzanja. Utječe na sitnozrnatost čelika jer je jak karbidotvorac. Time poboljšava rezne karakteristike brzoreznih čelika.

Nikal

Nikal ne stvara karbide i ima vrlo slabi afinitet prema ugljiku. Izrazito je gamageni element i proširuje područje austenita. Njime se povisuje žilavost i korozijsku postojanost. Nikal smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. U praksi se, zbog visoke cijene, uvijek legira sa nekim drugim legirnim elementom.

Silicij

Silicij se koristi kao sredstvo za dezoksidaciju. On povisuje čvrstoću, otpornost prema trošenju i granicu razvlačenja. Povisuje granicu elastičnosti i dinamičku izdržljivost pa se koristi u čelicima za opruge.

Titan

Titan djeluje izrazito deoksidirajuće, denitrirajuće i desulfirajuće. Ima visok afinitet prema kisiku, dušiku, sumporu i ugljiku. Najjači je karbidotvorac jer stvara vrlo stabilan karbid TiC. Ti karbidi se teško raspadaju pri povišenim temperaturama. Smanjuje austenitno područje. Ako postoji veći udio titana u čeliku, on može djelovati na percipitacijsko očvršćavanje stvaranjem intermetalnih spojeva (Ni_3Ti).

Vanadij

Vanadij povišuje tvrdoću i otpornost na trošenje stvaranjem stabilnog karbida VC ili V_4C_3 . Jak je karbidotvorac i nitridotvorac. Koristi se u brzoreznim čelicima te alatnim i konstrukcijskim čelicima namijenjenim za rad pri povišenim temperaturama.

Volfram

Volfram pripada karbidotvorcima. Tvori tvrde i toplinski postojane karbide. Sprječava rast zrna pri povišenim temperaturama i povišuje žilavost čelika. Volfram također povišuje granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću.

Mangan

Mangan se najčešće koristi kao deoksidator i desulfizator. Stvara sulfid MnS čime sprječava negativno djelovanje sulfida FeS. Legiranjem s ovim elementom povećava se prokaljivost čelika. Nezakaljenim čelicima poboljšava se čvrstoća i žilavost. Dodavanjem 1% mangana može dovesti do povišenja granice razvlačenja konstrukcijskih čelika za oko 100 N/mm^2 . Ukoliko je sadržaj mangana veći od 12%, čelicima se proširuje područje austenita. Tako je pri normalnoj temperaturi austenitna mikrostruktura.

3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Konstruktivski čelici se koriste kod izrade konstruktivskih dijelova strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju, ali i za nosive i građevinske konstrukcije. Oni 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 (korozivna postojanost u atmosferi ili u agresivnim tekućinama) te tehnološka svojstva (obradivi odvajanjem čestica, zavarljivi, sklonost hladnom oblikovanju i sl.).

Konstruktivski čelici se mogu podijeliti na ugljične (nelegirane) i legirane. Konstruktivski čelici koji sadrže manje od 0,60%C primjenjuju se za izradu strojeva i uređaja koji se koriste u neagresivnim sredinama pri temperaturama od -25 do 300°C.

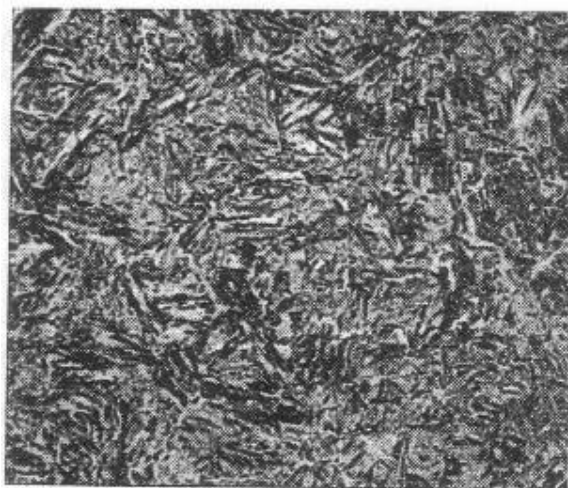
| UGLJIČNI (NELEGIRANI) ČELICI | |
|---|--|
| Opće namjene | Posebne namjene |
| <ul style="list-style-type: none"> • obična kvaliteta • kvalitetni čelici | <ul style="list-style-type: none"> • za građevinarstvo • za brodogradnju i željeznice • za kotlove i posude pod tlakom • za karoserijske limove • za cijevi, žice i zakivke • za zavarene lance • čelici za automate • za elektrotehniku |

| LEGIRANI ČELICI | |
|---|---|
| Opće namjene | Posebne namjene |
| <ul style="list-style-type: none"> • za poboljšavanje • za površinsko kaljenje • za cementaciju • za nitriranje | <ul style="list-style-type: none"> • za opruge • za kotrljajuće ležajeve • za rad pri niskim temperaturama • za ventile • čelici povišene čvrstoće |

Tablica 3. Opća podjela konstrukcijskih čelika prema kemijskom sastavu [1]

3.1 ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE

Tema rada su upravo ovi čelici, čelici za poboljšavanje i to Č.1531, Č.4732 i Č.5431. Ovi čelici pripadaju skupini nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika. Svoja 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)), a naknadnim popuštanjem što veća žilavost.



Slika 3. 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 nepormijenjeni. Može se zaključiti da se idealna jednolična svojstva preko cjelokupnog presjeka postižu samo potpunim prokaljivanjem. Tolerancije sastava su određene, a maseni udio nečistoća je jako nizak (P i S manje od 0,035%). Potpuno prokaljivanje je gašenje cijelog presjeka nadkritičnim intenzitetom kako bi mikrostruktura bila potpuni martenzit. Takav način omogućuje maksimalno moguću udarnu radnju loma i jednoličnost mehaničkih svojstava.

Čelici za poboljšavanje upotrebljavaju se za izradu konstrukcijskih dijelova, koji su za vrijeme rada izloženi velikim i složenim naprezanjima.

Poboljšavanje je termički postupak u kojem se čelik (većinom poluobrađen ili potpuno obrađen konstrukcijski dio), kali i neposredno poslije kaljenja ponovno lagano zagrijava na temperaturu preko 530°C i zatim polagano ili brzo hladi.

Naročito je važno i karakteristično što poboljšani čelici imaju visoku granicu razvlačenja i dobru čvrstoću i žilavost. To povoljno utječe na granicu zamaranja. Takvi čelici se ne zamaraju brzo, a osim toga veoma su otporni protiv dinamičkih naprezanja, osobito naizmjeničnih naprezanja i udara.

Č.1530 (C45)- primjenjuje 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)- primjenjuje se za veće dimenzije (do 100 mm) i viša radna opterećenja kao npr. dijelovi vozila i zrakoplova (kardanske osovine, koljenaste osovine, poluosovine automobila, zupčanici itd.).

Č.5432 (30CrNiMo8)- primjenjuje 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 koristi se kod velikih zupčanika, osovina turbogeneratorskih, ekscentra osovina, itd.

3.2 VRSTE ČELIKA

Čelici za poboljšavanje izrađuju se kao nelegirani (ugljični) i legirani čelici. Nelegirani čelici mogu biti kvalitetni i plemeniti. Oni se od navedenih kvalitetnih čelika razlikuju po većoj jednolikosti, čistoći te višoj kontrakciji (suženju) koja je također pokazatelj žilavosti.

Legirani čelici su svi plemeniti čelici. Kao glavni sastojci za legiranje dolaze u obzir mangan, silicij, krom, molibden, vanadij i nikal. Legirane čelike upotrebljavamo samo u poboljšanom stanju, inače njihova upotreba u žarenom stanju nije svrsishodna. Čelici za poboljšavanje podijeljeni su u dvije grupe:

- čelici kod kojih je ograničena samo gornja granica sadržaja sumpora (tablica 4)
- čelici kod kojih je u cilju bolje obradivosti skidanjem strugotine ograničena gornja i donja granica sadržaja sumpora [2]

| Vrsta čelika | C% | Si% | Mn% | P% max | S% max | Cr% | Mo% | Ni% |
|---------------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|
| Č.1531 | 0,42-0,50 | 0,15-0,35 | 0,50-0,80 | 0,035 | 0,035 | - | - | - |
| Č.4732 | 0,38-0,45 | 0,15-0,40 | 0,50-0,80 | 0,035 | 0,035 | 0,90-1,20 | 0,15-0,30 | - |
| Č.5431 | 0,30-0,38 | 0,15-0,40 | 0,40-0,70 | 0,035 | 0,035 | 1,40-1,70 | 0,15-0,30 | 1,40-1,70 |

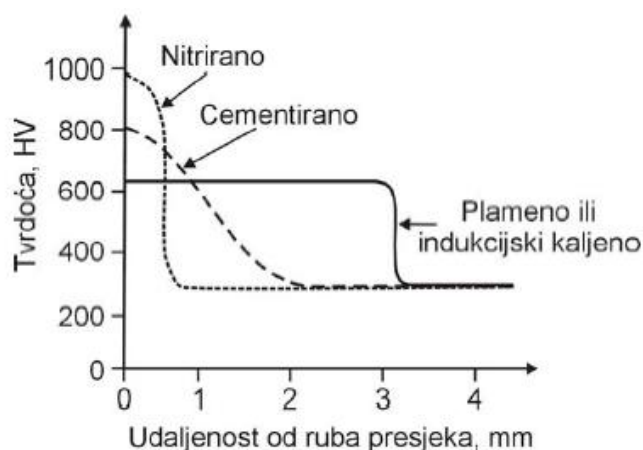
Tablica 4. Kemijski sastav zadanih čelika [3]

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

- Čelici za površinsko kaljenje

Površinskim kaljenjem (plameno ili indukcijsko) se može postići visoka otpornost na trošenje i dinamičku izdržljivost površinskog sloja. Time se postiže 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

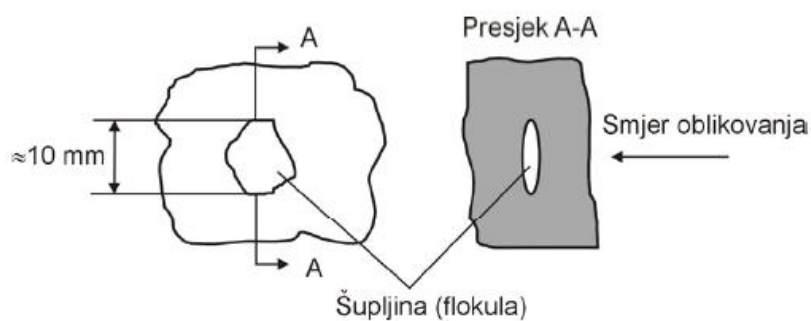
brzo grijati i hladiti (voda ili ulje) a da ne dođe do velikih toplinskih naprezanja i površinskih napuknuća. Imaju sniženi udio fosfora (manje od 0,025% nelegirani i manje od 0,035% niskolegirani) i visoke su čistoće što im osigurava visoku žilavost i jednoličnost tvrdoće zakaljenog sloja. Najčešće 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 4. Usporedba tvrdoće površinskog sloja toplinskim obradama [4]

- Čelici za velike otkovke

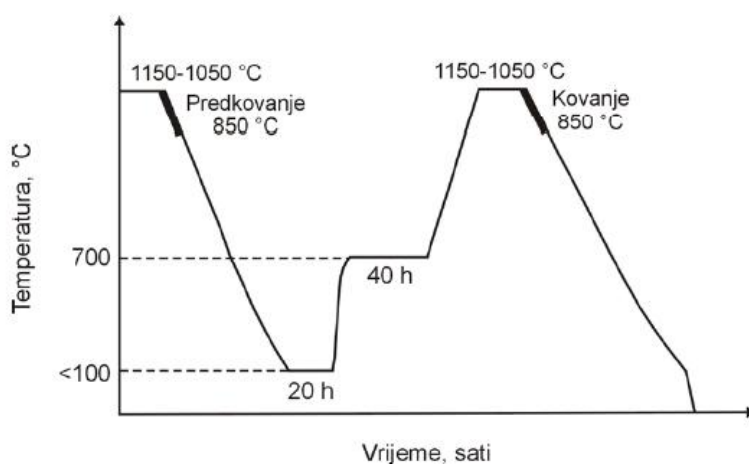
Primjenjuju se kod otkovaka velikih masa i promjera preko 100 mm. Zbog toga se kod hlađenja javljaju temperaturne razlike između površine i sredine presjeka što utječe na pojavu zaostalih naprezanja te se javlja opasnost od pukotina. Posebna je opasnost od pojava prisutnosti otopljenog vodika i stvaranja 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 stvaranja šupljina i pukotina- slika 5.



Slika 5. Shematski prikaz folikula [1]

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 provodi se i žarenje velikih otkovaka- slika 6.

Izborom vrste legiranih elemenata teži se bainitnoj strukturi jezgre te ih se legira sa molibdenom da se izbjegne pojava krhkosti popuštanja. Primjena ovih čelika je u cjevovodima i dijelovima visokotlačnih spremnika, osovinama parnih turbina i generatora, koljenastih osovina, prirubnica itd.



Slika 6. Dijagram žarenja velikih otkovaka [1]

3.3. Karakteristike čelika za poboljšavanje

3.3.1 Nelegirani čelici

Kod ugljičnih čelika ove vrste sadržajem ugljika i mangana povećava se čvrstoća. Ovi čelici, zbog male prokaljivosti upotrebljavaju se za strojne dijelove presjeka do 100 mm. Kod većih presjeka nisu osigurana mehanička svojstva jer nije moguće prokaliti jezgru.

Opće karakteristike nelegiranih (ugljičnih) čelika za poboljšavanje su:

- mala sklonost prema stvaranju pukotina pri zagrijavanju i hlađenju, čak i neovisno o načinu hlađenja
- slaba obradivost skidanjem strugotine u meko žarenom stanju, poboljšavanje obradivosti postiže se normalizacijom
- nemaju sklonost prema krhkosti kod popuštanja
- otpornost prema habanju raste sa sadržajem ugljika, a posebno se povisuje površinskim kaljenjem
- osjetljivost na zarez raste sa sadržajem ugljika (kritično kod čelika Č.1730,Č.1731)
- neotporni su prema koroziji; ta neotpornost raste također s porastom sadržaja ugljika

3.3.2 Legirani čelici za poboljšavanje

Mn čelici

Primjer manganskih čelika su Č.3130 i Č.3135.

Kod manganskih čelika, sadržaj mangana povisuje čvrstoću i to kako u meko žarenom tako i u normaliziranom i poboljšanom stanju. Mangan povoljno utječe na jednolikost poboljšanja po presjeku u slučaju malih dimenzija.

Kod mehaničkih svojstava mangan djeluje tek toliko što povisuje čvrstoću kod sobne temperature. Njegovo djelovanje na otpornost martenzita prema poboljšanju jedva se i primjećuje.

Dvije posebno loše strane ovih čelika su:

- naginju prema pogrubljenju zrna na temperaturi austenitizacije što općenito snizuje žilavost kako normaliziranog tako i poboljšanog strojnog dijela
- naginju pojavi krtosti popuštanja

Cr čelici

Primjeri krom čelika su: Č.4130, Č.4131, Č.4132; Č.4180, Č.4181, Č.4184.

Žilavost kod krom čelika raste dodatkom kroma, a i prijelazne temperature pada žilavosti potiskuju se u niža temperaturna područja. Kod čelika za poboljšavanje, krom umjereno povisuje prokaljivost. Sadržaj kroma djeluje u smislu usitnjenja zrna pa se može očekivati relativno dobra žilavost.

Cr-Mn-V čelik

Primjer krom- mangan- vanadij čelika je Č.4830.

Nedostatci jednostruko legiranog krom čelika djelomično se otklanjaju nešto povišenim dodatkom mangana. No, kako bi dodatak samo mangana izazvao jak efekt porasta zrna, dodaje se još nešto vanadija da se taj porast spriječi. Glavni zadatak mangana je da poveća prokaljivost i omogući uporabu većih dimenzija nego kod manganskih čelika, dok vanadij sprječava porast zrna i tako indirektno djeluje na žilavost.

Cr-Mo čelici

Primjeri krom- molibdenskih čelika su Č.4730, Č.4731, Č.4732, Č.4733.

Molibden povisuje čvrstoću ferita, pojačava jednolikost poboljšanja po presjeku, snizuje puzanje na povišenim temperaturama i povisuje otpornost prema popuštanju.

Utjecaj molibdena na svojstva poboljšanih dijelova na sniženim temperaturama je vrlo povoljan, ali treba primijetiti da na to ponašanje utječe kako način kaljenja (ulje, voda) tako i čvrstoća poboljšanja. Prijelazna temperatura je pomaknuta u područje nižih temperatura pa se čelik sa sigurnošću može upotrijebiti barem na temperaturi - 50°C.

Cr-Mo-V čelik

Primjer krom- molibden- vanadij čelika je Č.4734.

Djelovanje vanadija u principu se svodi na povišenje čvrstoće feritnog mješanca. Važnije je međutim djelovanje vanadija na usitnjenje zrna uslijed vrlo fine disperzije vrlo finih karbidnih čestica. Vanadij povisuje otpornost prema popuštanju ako su temperature kaljenja bile visoke pa je veći dio vanadija ili sam vanadij prešao u otopinu. Istodobno pada žilavost, djelomično zbog pogrubljenog zrna, a djelomično zbog izlučivanja posebnih vanadij karbida. Zbog visokog afiniteta vanadija prema dušiku ovaj je čelik sposoban za nitriranje koje osobito povisuje otpornost prema trošenju. U pogledu ponašanja na niskim temperaturama vanadij djeluje tek toliko što usitnjuje zrno pa tako indirektno povisuje žilavost. Zbog relativno slabog djelovanja vanadija na prokaljivanje treba kod dijelova većih dimenzija očekivati nejednolikost svojstava po presjeku pri poboljšanju.

Ni-Cr-Mo čelici

Primjer nikal- krom- molibden čelika su Č.5430, Č.5431, Č.5432. Dodatak nikla snizuje kritičnu brzinu hlađenja pa se povećanim dodatkom nikla može povisiti jednolikost poboljšanja presjeka sve do najvećih dimenzija. Nikal ne uzrokuje pad žilavosti u poprečnom smjeru jer nema afinitet prema kisiku. Krom i nikal zajedno znatno utječu na sniženje kritične brzine hlađenja, pri čemu nikal još i

snizuje transformacijske temperature. Dodatak molibdena je potreban kako bi se spriječila sklonost Ni-Cr čelika prema krtosti popuštanja. Nikal i krom zajedno stabiliziraju austenit pa je vjerojatno da će nakon kaljenja ovih čelika redovito zaostati nešto austenita.

Razlog velikog broja ovih čelika je upravo potreba za različitim svojstvima te zadovoljavanje raznih zahtjeva. Mnoštvo ovih čelika, konstruktoru znatno otežava izbor pravog materijala koji će zadovoljiti cijenu i kvalitetu. Zbog toga je u našoj zemlji sprovedena tipizacija čelika pa je područje izbora suženo, ali i dalje dovoljno veliko.

Vrlo je teško odlučiti koje svojstvo poboljšanog dijela je najvažnije u radu tog dijela. Cijeli razvoj čelika za poboljšavanje se osnivao na težnji da se postignu što je moguće veća čvrstoća, granica razvlačenja i izduženje. Svojstvo žilavosti i dinamičke izdržljivosti je uvijek bilo u drugom planu.

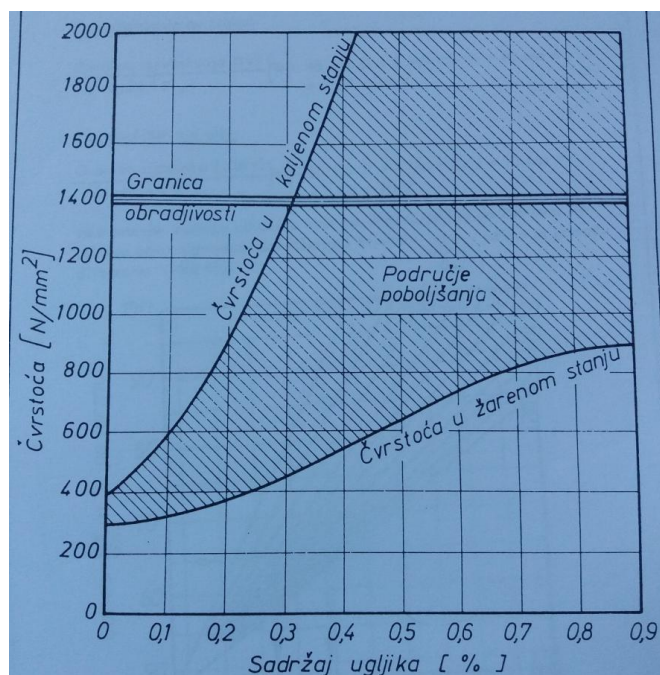
Uz veliku raznovrsnost čelika za poboljšavanje i različitost njihovih svojstava, jasno je da je nemoguće postaviti neku univerzalnu formulu za izbor čelika. Očito je da će se morati proučavati istražena svojstva i kvaliteta čelika, pa da će potrošač tek tada biti u mogućnosti sigurnije odabrati prikladan čelik. [2]

3.4 Mehanička svojstva poboljšanog čelika

Utjecaj poboljšanja na mehanička svojstva čelika, ocjenjuje se na osnovu mehaničkih ispitivanja (npr. određivanje čvrstoće i granice razvlačenja, izduženja i kontrakcije, žilavosti, određivanje mehaničkih svojstava na povišenim i visokim temperaturama, određivanje trajne čvrstoće, određivanje mehaničkih svojstava kod dinamičkih opterećenja). Poboljšavanjem se mogu mijenjati mehanička svojstva čelika u vrlo širokim granicama.

Za konstruktore je vrlo važna granica razvlačenja. Ako čelik nema jasno izraženu granicu razvlačenja, određuje se tzv. 0,2% granica. Odnos granice razvlačenja i čvrstoće čelika razlikuje se za pojedine vrste čelika. Istovremeno ovaj odnos ovisi o dimenziji i poboljšanju u presjeku.

Na slici 7. Se može vidjeti čvrstoća nelegiranog ugljičnog čelika malih dimenzija u žarenom i kaljenom stanju u zavisnosti od sadržaja ugljika u čeliku. Između ova dva ograničenja (žareno i kaljeno stanje) rasprostire se čitavo područje u kojem se mogu postići čvrstoće čelika pri poboljšanju kod različitih kombinacija kaljenja i popuštanja pri raznim sadržajima ugljika u čeliku.

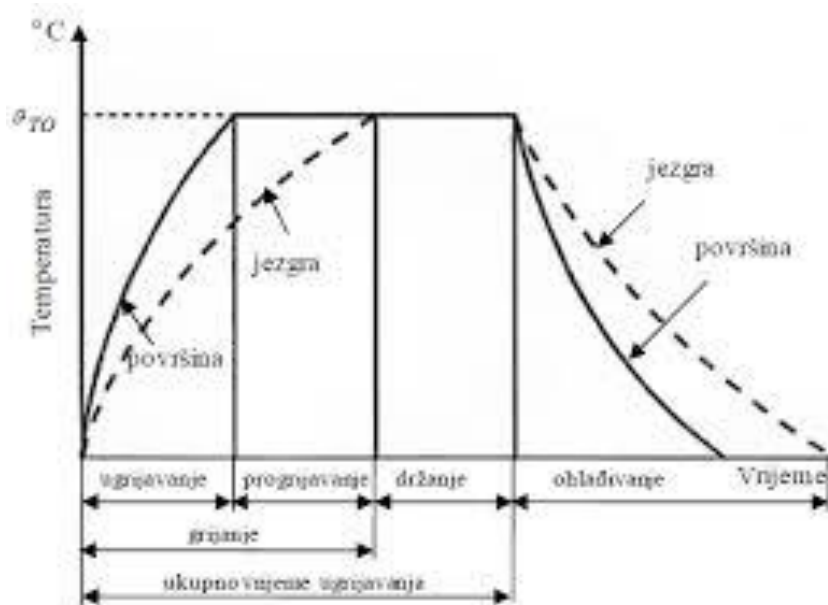


Slika 7. Mehaničke osobine nelegiranih čelika u zavisnosti od sadržaja ugljika [2]

4. TOPLINSKA OBRADA I POBOLJŠANJA

Toplinska obrada se provodi s ciljem mijenjanja mikrostrukture materijala u svrhu znatnijeg povećanja čvrstoće. Zapravo nastaju novi mikrostrukturni oblici različiti od onih u pripadnim ravnotežnim stanjima. Predmet se namjerno podvrgava temperaturno- vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mehanička, fizička i kemijska svojstva. Tako se povećava vlačna čvrstoća, žilavost i smanjuju unutrašnja naprezanja. Temeljni parametri postupaka su temperatura (T (K), F ($^{\circ}\text{C}$)) i trajanje (t , (s, min, h)). Stavljajući ta dva parametra u omjer dobiva se treći parametar, a to je brzina ohlađivanja, odnosno grijanja. Skraćuje li se trajanje ohlađivanja sve više i povišuje li se brzinu ohlađivanja, difuzija je sve nepotpunija pa čak i potpuno izostaje ako nhl prekorači neku graničnu vrijednost.

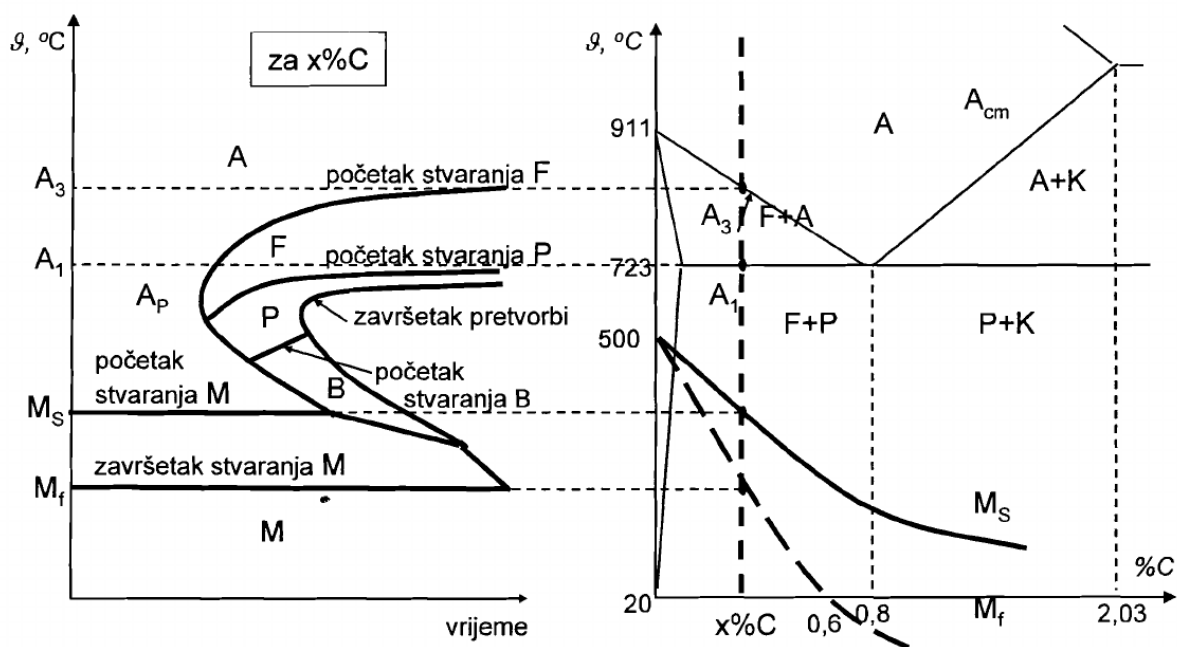
Temelj toplinske obrade je autektoidna reakcija raspada austenita na ferit i cementit. Odabirom postupka toplinske obrade mijenja se i način raspada austenita i zato je potrebno najprije provođenje austenitizacije za dobivanje austenita.



Slika 8. Dijagramski prikaz postupka toplinske obrade [2]

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.

Pretvorba austenita u druge faze u ovisnosti o brzini hlađenja prati se putem TTT- dijagrama (eng. Time, Temperature, Transformation = vrijeme, temperatura, pretvorba) koji su različiti za različite čelike. Pomoću njih se određuje količina pretvorenog austenita u funkciji brzine i temperature ohlađenja. Također je vidljiva vrsta i količina nastalih faza prema slici 9.



Slika 9. Konstrukcija TTT- dijagrama

F – pretvorba austenita u primarni ferit

P – pretvorba austenita u perlit

B – pretvorba austenita u bainit

M – pretvorba austenita u martenzit.

Toplinske obrade s ciljem promjene kemijskog sastava površine:

a) Cementiranje ili pougljičenje Je postupak koji se sastoji od pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Osnovni cilj cementiranja je obogaćivanje površinskih slojeva čelika ugljikom (najpovoljnije je sadržaj oko 0,8%C), radi dobivanja tvrdog površinskog sloja (minimalno 60 HRC) otpornog na trošenje, a da pri tom niskougljična jezgra ($s < 0,25\%C$) ostane žilava (otporna na udarce). Postupak cementiranja može se provoditi uz pougljičenje u različitim sredstvima: granulatu, solnoj kupki, fluidiziranoj kupki, plinskoj atmosferi ili ioniziranom plinu.

→ Pougljičenje u granulatu je najstariji, najjednostavniji i najjeftiniji način pougljičavanja. Proizvođači granulata daju tehničke podatke o potrebnom trajanju pougljičenja za određenu dubinu i primjenjivosti granulata za upotrjebljeni čelik.

→ Pougljičenje u solnim kupkama daje određeni C-potencijal, a izborom soli moguće je postići njegove različite vrijednosti. Pri radu sa solnim kupkama potrebne su posebne mjere opreza i postrojenje za neutralizacija otrovnih otpadnih tvari.

→ Pougljičenje u plinskim atmosferama (CO , CH_4 i drugi ugljikovodici, etilacetat, metanol) je znatno brže nego u granulatu, a moguća je i izvrsna regulacija C-potencijala atmosfere, kao i rad s više C-potencijala, odnosno promjenljivim C-potencijalom.

b) Nitiranje ili dušičenje je postupak u kojem u površinu čelika difundira dušik pa se stvaraju Fe-nitridi (npr. Fe_4N i $Fe_{2-3}N$) Svim postupcima nitiranja i nitrokarburiranja zajedničko je da se odvijaju ispod temperature A_1 tako da mikrostruktura u jezgri obratka ne doživljava nikakvu promjenu (uz nužno prethodno kaljenje i popuštanje na dovoljno visoku temperaturu). Nitiranje se može provoditi u prašku, solnim kupkama (npr. postupak TENIFER), plinu i u plazmi ioniziranih plinova. Svojstva nitiranih dijelova: povišena površinska tvrdoća, povećana otpornost na (adhezijsko) trošenje, povećana otpornost na koroziju, dobra otpornost trošenju na povišenim temperaturama ($500-550^\circ C$),

otpornost toplinskom umoru, povećana dinamička izdržljivost, male ili zanemarive deformacije obratka.

c) Boriranje je toplinsko-difuzijski postupak pri kojem u površinske slojeve difundira bor na temperaturama od 800 do 1100°C u trajanju od nekoliko sati. Provodi se u prašku (granulatu), pasti (pogodno za lokalno boriranje), plinskim atmosferama (vrlo otrovan i rijetko primjenjivan postupak), solnim kupkama, te u plazmi ioniziranih plinova. Dubine boridnih slojeva su od nekoliko desetaka μm do 0,3 mm. Tvrdće boridnih slojeva iznose oko 2000 HV. Nakon boriranja obratci se mogu naknadno zakaliti pri čemu se ne smije koristiti "oštro" sredstvo za gašenje zbog mogućeg pucanja boridnog sloja. Borirani dijelovi imat će, uz nešto nižu žilavost i čvrstoću savijanja, vrlo visoku tvrdoću, visoku otpornost na trošenje (abraziju, eroziju, kavitaciju) i postojanost na temperaturama do oko 600°C, otpornost prema kiselinama i lužinama. Primjeri: trnovi i žigovi za duboko vučenje, dijelovi mjenjača, valjci za graviranje, dijelovi za oblikovanje betona, kalupi za prešanje, sapnice za lijevanje, dijelovi ventila

d) Karbonitriranje i dr.

4.1 POBOLJŠAVANJE

Poboljšavanje je postupak termičke obrade čelika koji se sastoji iz kaljenja i popuštanja na relativno visoke temperature, koje se često već približavaju temperaturama mekog žarenja. S obzirom na upotrebljeno rashladno sredstvo pri kaljenju se govori o poboljšanju u vodi, u ulju ili na zraku.

Poboljšavanje se, uglavnom, primjenjuje u termičkoj obradi konstrukcijskih i nekih alatnih čelika. Cilj mu je poboljšati mehanička svojstva čelika i to naročito žilavost.

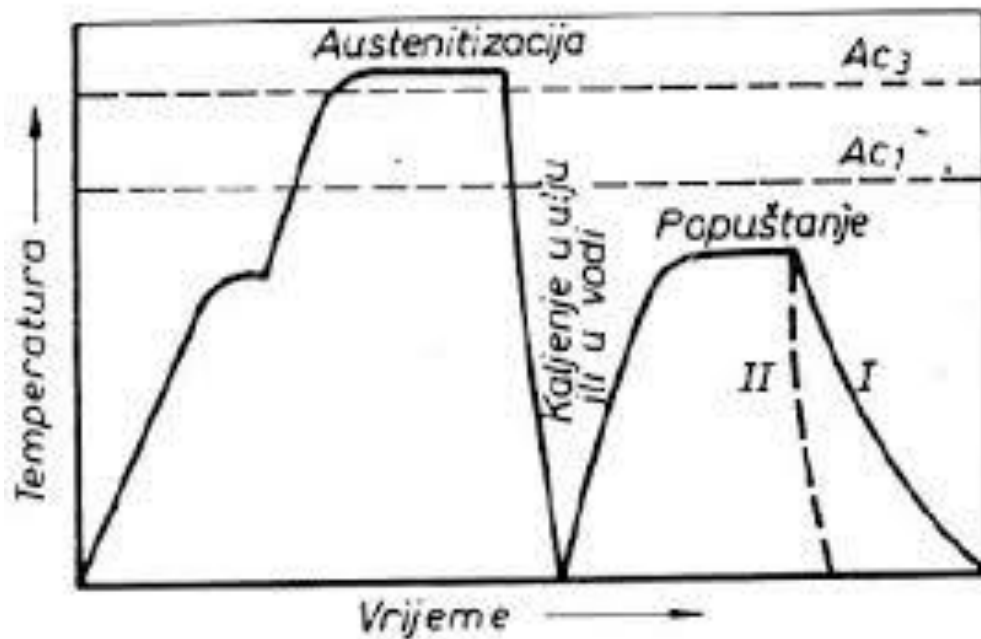
Za samo izvođenje poboljšanja vrijede opće upute za kaljenje i popuštanje, s tom razlikom da su u procesu poboljšanja temperature popuštanja više.

| Vrste čelika | Temperatura kaljenja u vodi °C | Temperatura kaljenja u ulju °C | Temperatura popuštanja °C |
|--|--|--|-------------------------------|
| Č.1330, Č.1331, Č.1430, Č.1431, Č.1480, Č.1530, Č.1531 , Č.1534, Č.1580 Č.1630, Č.1631, Č.1633, Č.1680 Č.1730, Č.1731, Č.1780 | 860-890 840-870 820-850 805-835 800-830 | 870-900 850-880 830-860 815-845 810-840 | 550-660 |
| Č.3130 Č.3135 | 820-850 | 830-860 | 550-660 |
| Č.4130, Č.4180 Č.4131, Č.4181 Č.4132 Č.4133 Č.4134, Č.4184 | 830-860 820-850 830-860 820-850 825-855 | 840-870 830-860 840-870 830-860 835-865 | 540-680 550-660 540-680 |
| Č.4730 Č.4731, Č.4783 Č.4732 , Č.4782 Č.4733 Č.4734 Č.4738 Č.4830 | 840-870 830-860 820-850 820-850 840-870 - 820-850 | 850-880 840-870 830-860 830-860 850-880 860-900 830-860 | 540-680 |
| Č.5430 Č.5431 Č.5432 Č.5480 | 820-850 - - - | 830-860 830-860 830-860 850-880 | 540-680 |

Tablica 5. Temperature kaljenja i popuštanja [3]

4.1.1 Postupak običnog poboljšanja

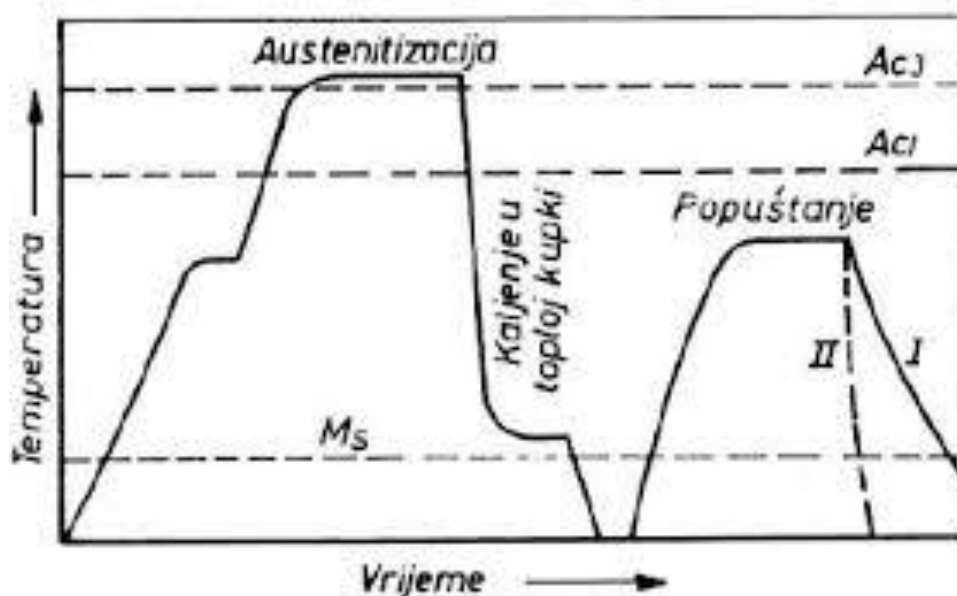
Uobičajeni postupak poboljšanja se sastoji od običnog kaljenja austenitizacijom od 30 do 50°C iznad A_{c3} , odgovarajućeg ohlađivanja u vodi, ulju ili na zraku i popuštanju na odgovarajuću temperaturu ispod A_{c1} . Pri ohlađivanju s temperature popuštanja potrebno je obratiti pažnju na sklonost čelika krtosti nakon poboljšanja.



Slika 10. Režim običnog postupka poboljšanja [2]

- I. Hlađenje na zraku ili u peći za čelike, koji su otporni prema krtosti popuštanja
- II. Hlađenje u vodi ili u ulju za čelike, koji su skloni krtosti popuštanja

U toku vremena su u ovaj klasični način poboljšanja uvedene neke promjene. Razvijeni su novi postupci, moderniji, ekonomičniji i ponekad efikasniji. Jedan od tih postupaka je kaljenje u toploj kupci. To je jedna varijanta klasičnog postupka sa zadržavanjem ohlađivanja iznad temperature M_s do izjednačenja temperature po čitavom presjeku. Također se spominje postupak izotermičkog poboljšanja koji je posve nov postupak, a bitno je različit od klasičnog načina poboljšanja.



Slika 11. Režim poboljšanja u toploj kupki [2]

- I. Hlađenje na zraku ili u peći za čelike koji su otporni prema krtosti popuštanja
- II. Hlađenje u vodi ili u ulju za čelike koji su skloni krtosti popuštanja

4.1.2 Postupak izotermičkog poboljšanja

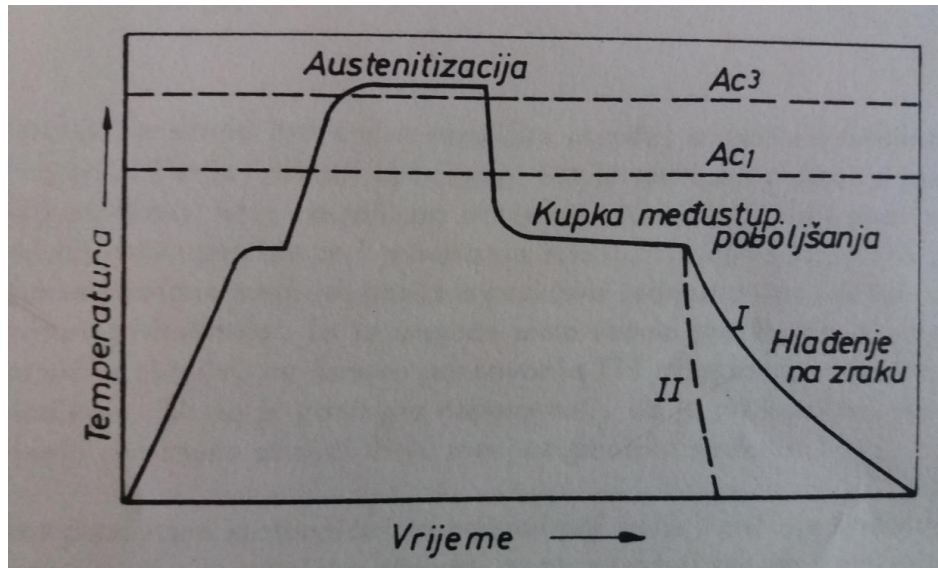
Taj najnoviji postupak poboljšanja poznat je i pod nazivom međustupanjsko poboljšavanje ili izotermalno kaljenje. U američkoj literaturi postupak je poznat pod nazivom „Austempering“.

Međustupanjsko poboljšavanje predstavlja postupak kojim se smanjuju napetosti u čeliku i postiže velika žilavost čelika. Ovaj postupak je praktično dobro izvediv samo za srazmjerno male dimenzije ili za čelike koji dobro prokaljuju.

Princip međustupanjskog poboljšanja se temelji na poznavanju TTT dijagrama. Izvodi se tako da se komad s temperature austenitizacije prenese neposredno u kupku s temperaturom iznad temperature martenzitnog preobražaja.

Na toj temperaturi u kupci treba zadržati čelik dok se potpuno ne izvrši preobražaj u međustupnju. Zatim se hladi na zraku. U tom se međustupnju poboljšavanje razlikuje od termalnog kaljenja, u kojem se čelik samo zadrži na temperaturi iznad martenzitnog preobražaja do izjednačenja temperature po presjeku. Martenzitni preobražaj se izvrši prilikom hlađenja na zraku poslije vađenja iz kupke. Optimalna temperatura kupke međustupanjskog poboljšanja je ona koja odgovara preobražajnom maksimumu u međustupnju. Najčešće je to temperatura od 300 do 500°C.

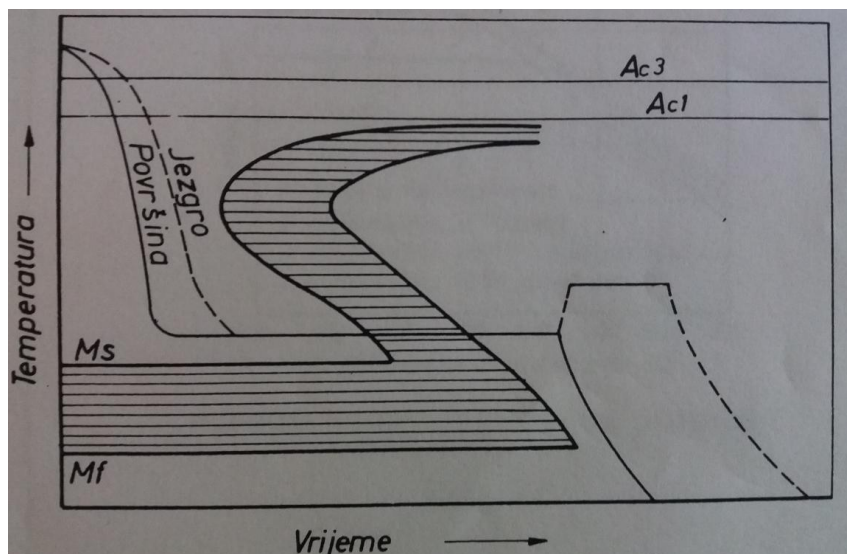
Za međustupanjsko poboljšavanje, za razliku od običnog poboljšanja, popuštanje nije neophodno potrebno. Ovaj se postupak mora precizno izvoditi, jer već male količine perlita, odnosno martenzita, pogoršavaju žilavost čelika. Isto tako dobre vrijednosti granice razvlačenja mogu se postići samo potpunim preobražajem u međustupnju.



Slika 12. Režim međustupanjskog poboljšanja [2]

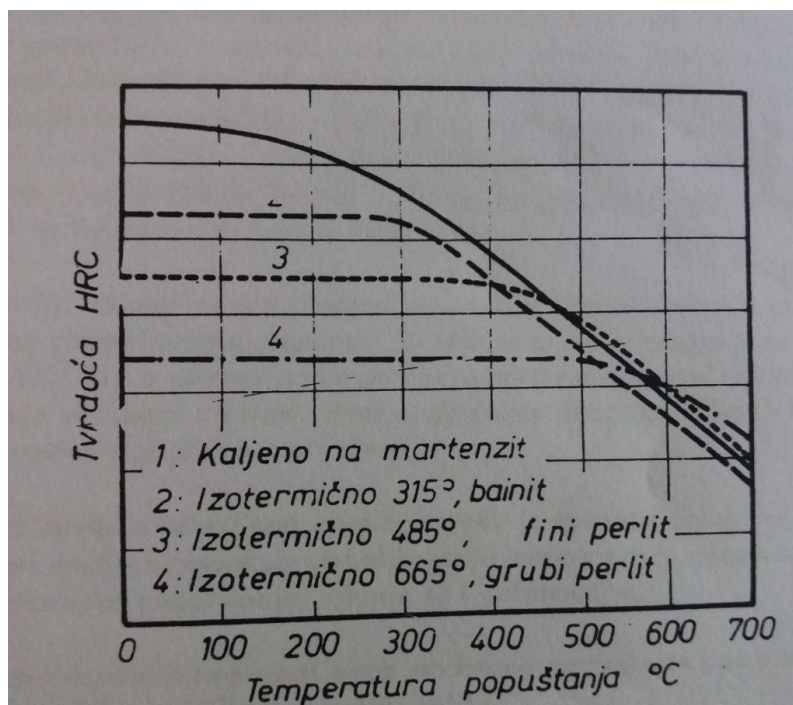
- I. Hlađenje na zraku ili u peći za čelike koji su otporni prema krtosti popuštanja
- II. Hlađenje u vodi ili u ulju za čelike, koji su skloni krtosti popuštanja

Najveća prednost izotermne termičke obrade, a posebno međustupanjskog poboljšanja, je što sprječava stvaranje pukotina na komadima. Pukotine nastaju pri običnom načinu kaljenja i popuštanja. Na taj način se postiže povećanje žilavosti. Još veća je prednost ako se postigne međustupanjska struktura jednostavnim postupkom kontinuiranog hlađenja. To je moguće samo veoma preciznim izvođenjem termičke obrade, na osnovu poznavanja TTT dijagrama za kontinuirano hlađenje (slika 13). Pri kontinuiranom hlađenju je nemoguće postići čistu međustupanjsku strukturu.



Slika 13. Shematski prikaz međustupanjskog poboljšanja u odnosu na TTT dijagram [2]

Ako se popušta izotermički transformirani čelik, tvrdoća dobivena nakon ove termičke obrade počinje znatno padati tek na temperaturi popuštanja koja je viša od temperature izotermičkog preobražaja (slika 14).



Slika 14. Promjena tvrdoće pri popuštanju izotermički transformiranog čelika [2]

Postupak međustupanjskog poboljšanja se u našoj zemlji malo primjenjuje. To je velika šteta jer ta vrsta poboljšanja na nekim područjima ima velike prednosti u pogledu mehaničkih svojstava.

Kod nelegiranih čelika se može postići visoka vrijednost žilavosti i izduženja uz visoku tvrdoću.

Često se mogu kod tako visokih tvrdoća postići tako dobra svojstva ili čak bolja nego u skupljim legiranim čelicima.

Postoji određeno područje tvrdoće odnosno čvrstoće čelika u kojem su dijelovi poboljšani u međustupanjsku strukturu kod jednake tvrdoće po ostalim mehaničkim svojstvima znatno bolji od onih koji su klasično poboljšani. Izvan tog područja tvrdoća, prednosti međustupanjskog poboljšanja, nisu tako očite. Velika prednost pri poboljšavanju u međustupnju je mogućnost dobivanja visoke žilavosti vezane uz visoku tvrdoću (50 do 55 HRC). To pruža mogućnost optimalne otpornosti na habanje i žilavost.

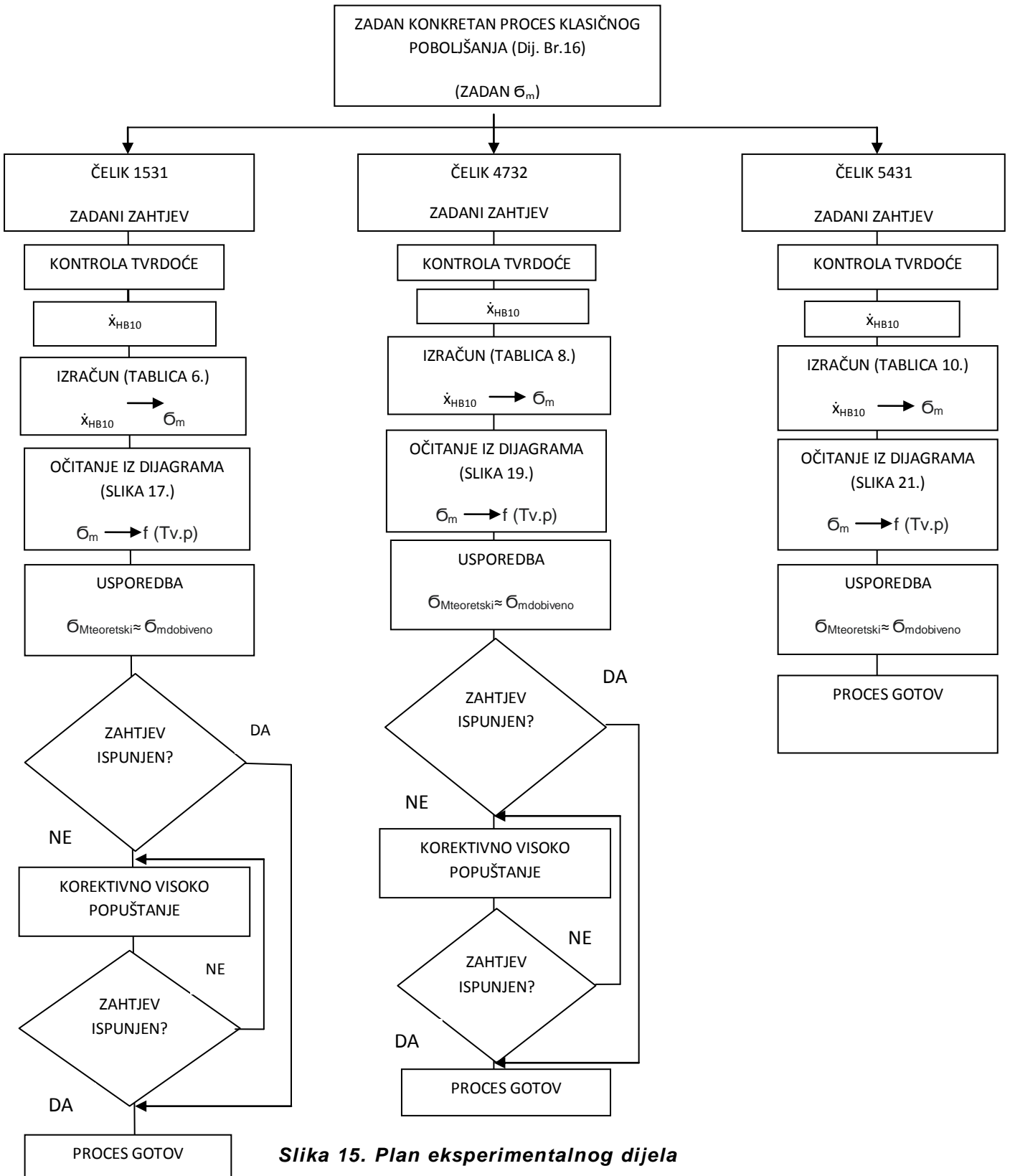
Neki čelici za postizanje određene visoke čvrstoće moraju se kod klasičnog poboljšavanja popuštati na relativno nisku temperaturu (od 250 do 400°C). Upravo u tom području temperatura se kod nekih čelika pojavljuje izrazita krtoš. Kod međustupanjskog poboljšanja na istu čvrstoću te pojave nema.

Kod postizanja određene visoke tvrdoće je opasnost pukotina pri međustupanjskom poboljšavanju mnogo manja nego kod klasičnog postupka poboljšanja. Manje su i deformacije.

Jedna od značajnih prednosti ovog modernog postupka je postizanje bolje dinamičke izdržljivosti nekih čelika.

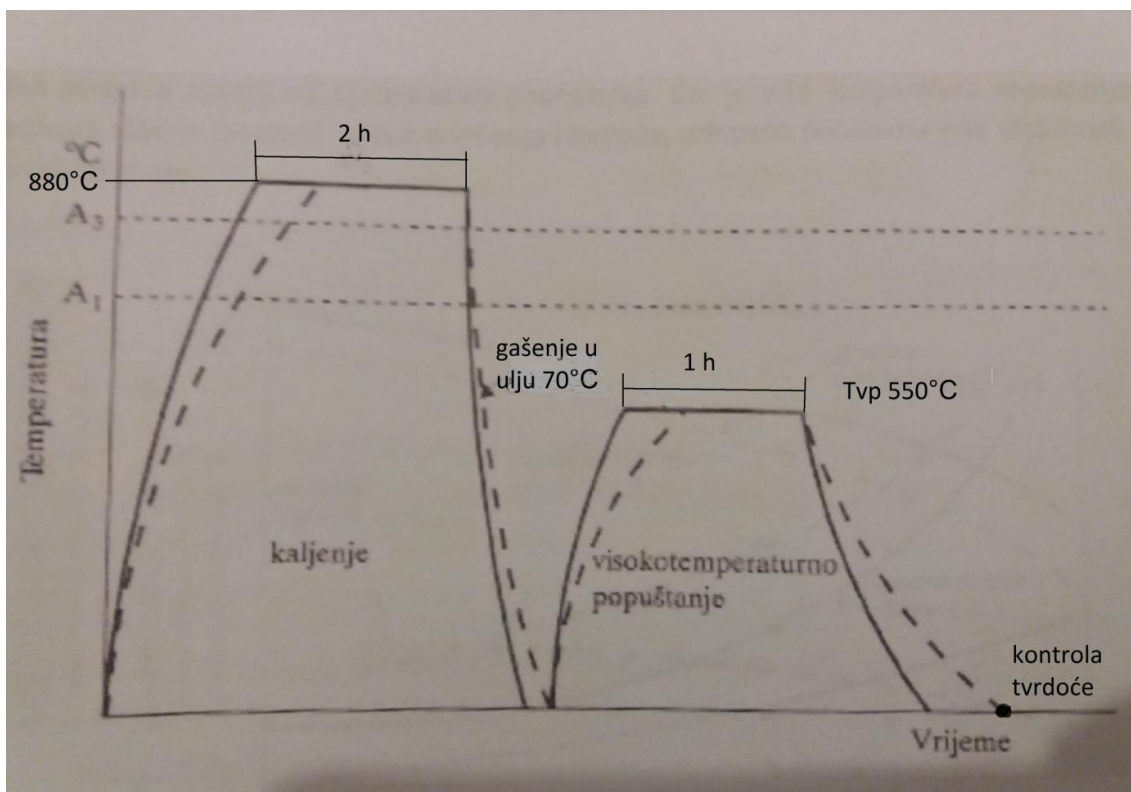
5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1 PLAN EKSPERIMENTALNOG DIJELA



Slika 15. Plan eksperimentalnog dijela

Zadatak eksperimentalnog dijela u ovom radu sastoji se od 3 čelika koja istovremeno moraju proći kroz proces poboljšanja. Proces se sastoji od zagrijavanja na temperaturu od 880°C, gašenja u ulju na 70°C i visokotemperaturnog popuštanja na temperaturi od 550°C. Na kraju procesa potrebno je napraviti kontrolu tvrdoće kao što je vidljivo na slici 16.



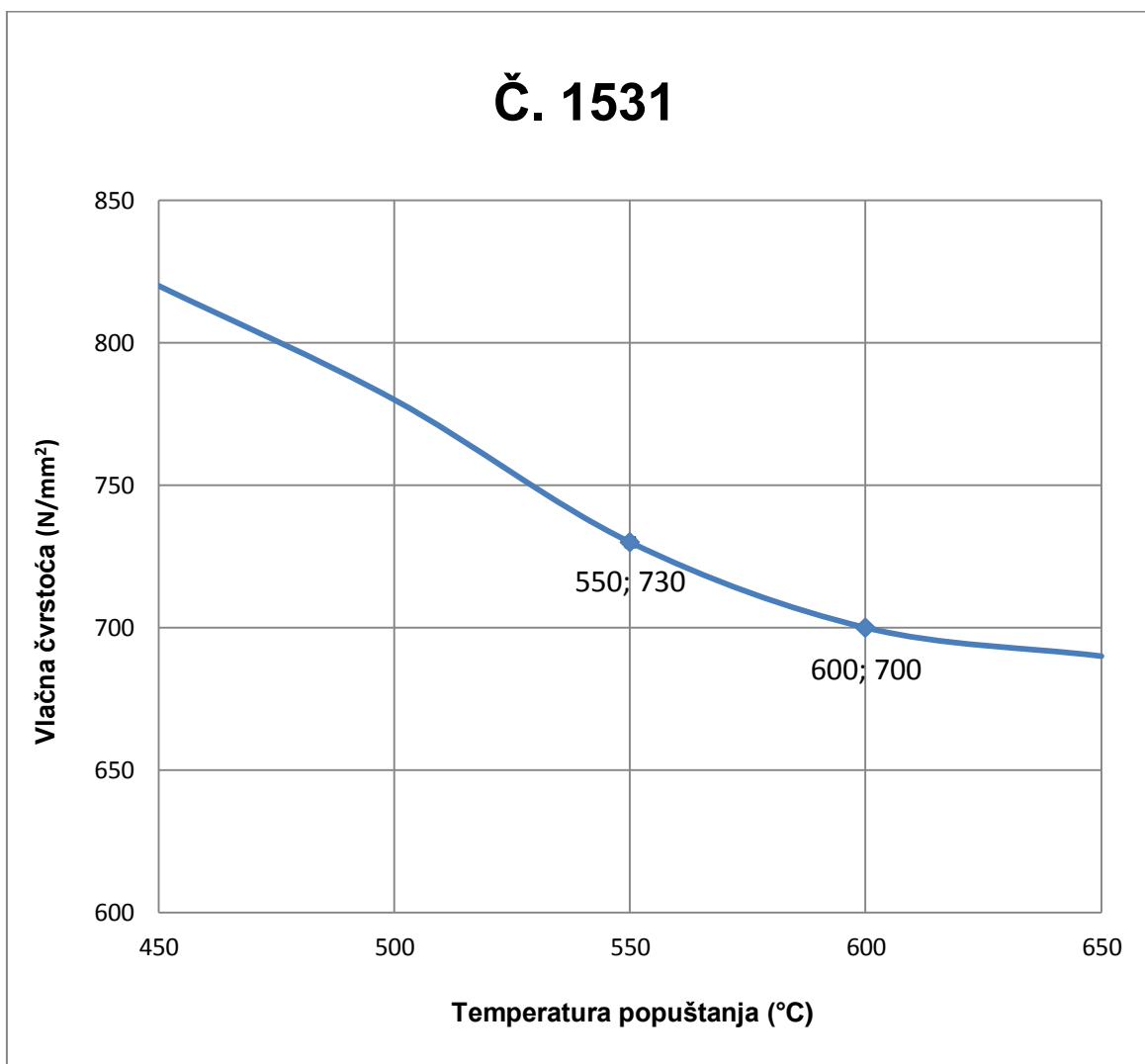
Slika 16. Dijagram postupka poboljšavanja

Tri čelika koja su zadana su Č.1531, Č.4732 i Č.5431.

Prema literaturi je odabrana temperatura visokog popuštanja od 550°C.

U zadatku završnog rada je za svaki pojedini čelik zadana čvrstoća koju treba ostvariti. Za čelik 1531 zadano je $\sigma \approx 700$ (N/mm²).

Iz grafičkog prikaza (slika 17.) se može iščitati da je vlačna čvrstoća pri temperaturi od 550°C približno 730 N/mm². To se utvrđuje mjerenjima.



Slika 17. Utjecaj temperature na čvrstoću za Č.1531 [3]

Tvrdoća je izmjerena Brinellovom kuglicom $\phi 2,5$ opterećenjem od 187,5 N.

Vlačna čvrstoća σ je dobivena preko tvrdoće formulom :

$$\sigma \approx \frac{HB}{3} \times g \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

| Mjerenje | HB 2,5 | $\bar{\sigma}$ (N/mm ²) |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| 1 | 223 | 729,2 |
| 2 | 219 | 716,1 |
| 3 | 218 | 712,9 |
| 4 | 215 | 703 |
| 5 | 217 | 709,6 |
| 6 | 219 | 716,1 |
| 7 | 225 | 735,8 |
| 8 | 224 | 732,5 |
| 9 | 223 | 729,2 |
| 10 | 219 | 716,1 |
| \bar{x} | 220 | 720 |

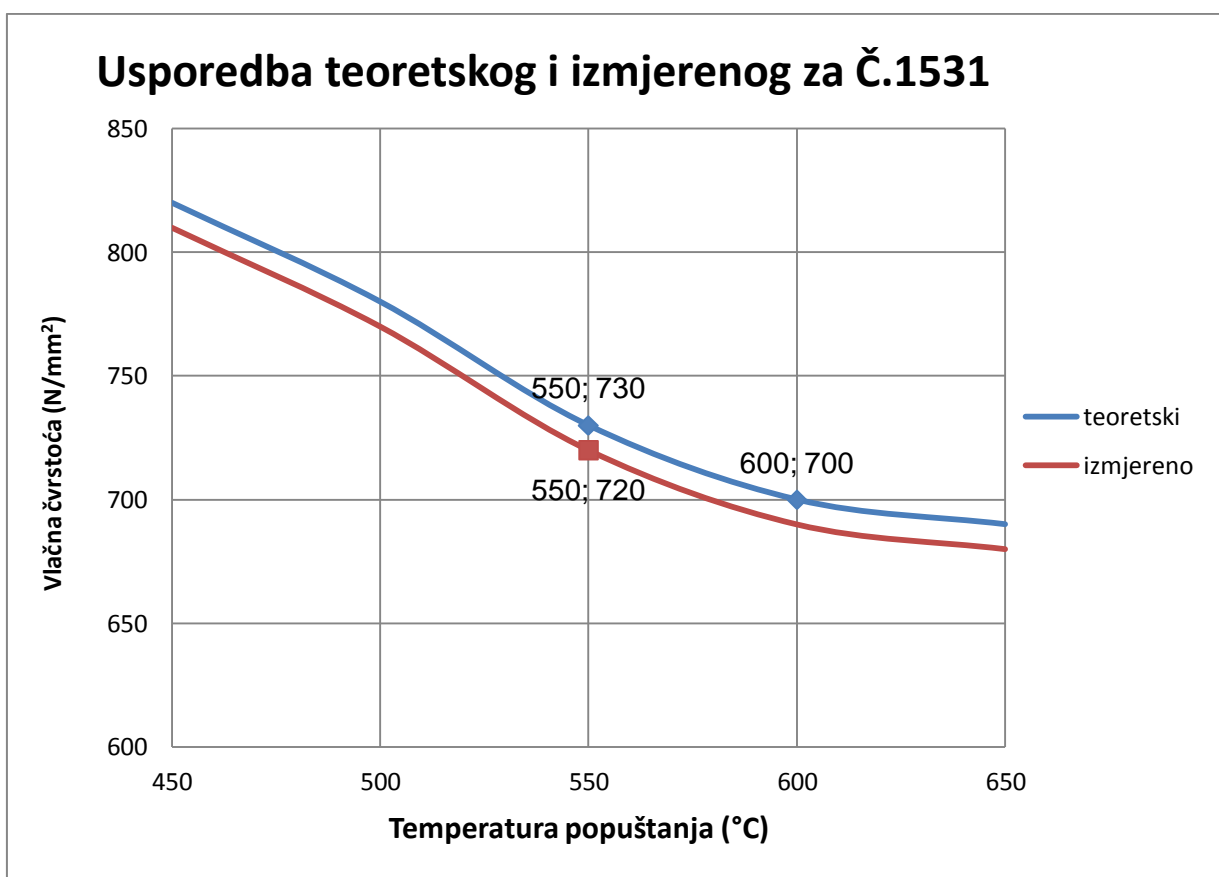
Tablica 6. Mjerenje Č.1531 [3]

Iz grafičkog prikaza je vidljiva teoretsku vrijednost od 730 N/mm² za Č.1531. U 10 mjerenja se dobije vrijednost od 720 N/mm². Na slici 18. se može iščitati usporedba teoretske i dobivene vrijednosti. Plavom bojom je označena teoretska vrijednost, a crvenom stvarno izmjerena.

Čelik 1531 se mora dodatno visoko popuštati jer ne zadovoljava zadani uvjet za čvrstoću. Sa dodatnih 5 mjerenja na temperaturi od 600°C zadovoljen je uvjet od $\bar{\sigma} \approx 700$ (N/mm²).

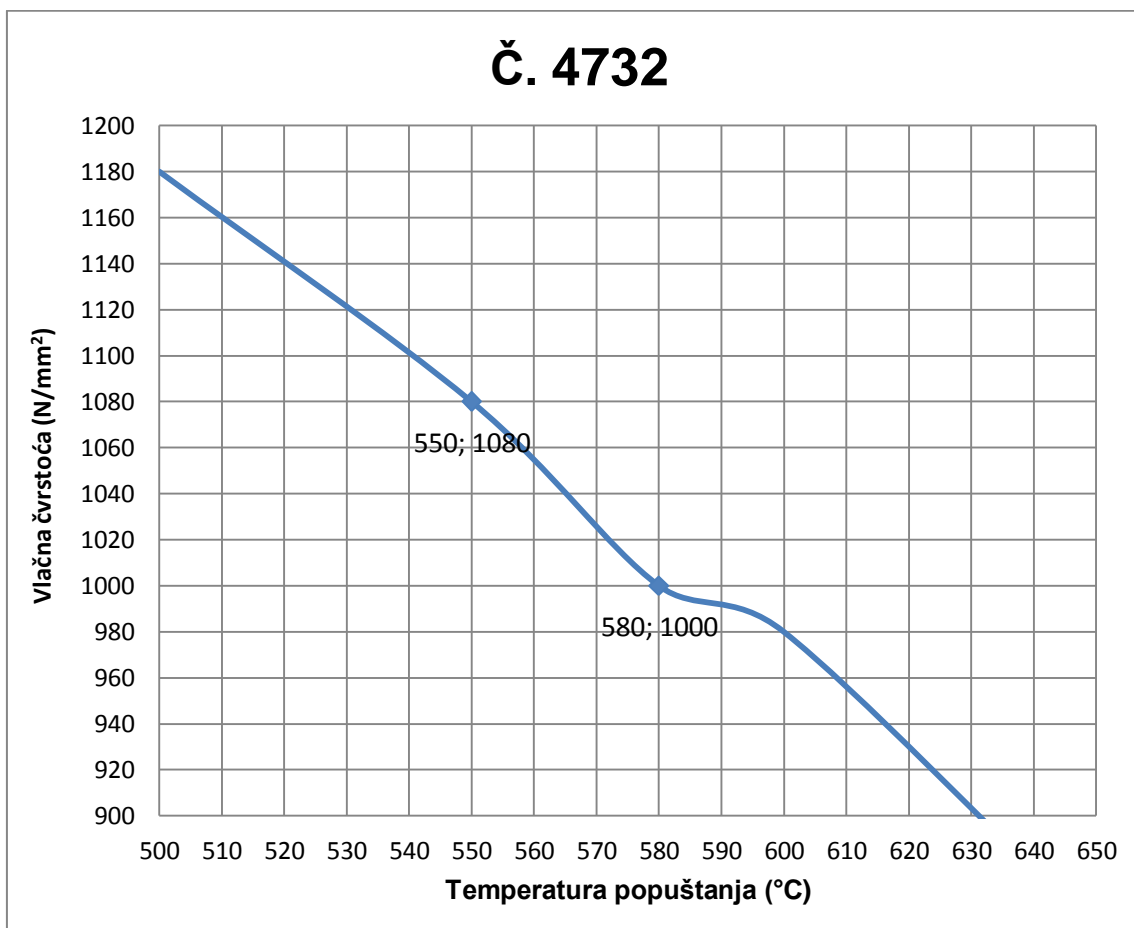
| Mjerenje | HB 2,5 | $\bar{\sigma}$ (N/mm ²) |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| 1 | 216 | 706,3 |
| 2 | 215 | 703 |
| 3 | 214 | 700 |
| 4 | 212 | 693,2 |
| 5 | 213 | 696,5 |
| \bar{x} | 214 | 700 |

Tablica 7. Drugo mjerenje Č.1531 [3]



Slika 18. Usporedba teoretskog i izračunatog za Č.1531 [3]

Za Č.4732 je zadana $\sigma \approx 1000$ (N/mm²). Sa slike 19. iz grafičkog prikaza za Č.4732 vidi se da je vlačna čvrstoća pri temperaturi od 550°C jednaka otprilike 1080 N/mm². To se provjerava mjerenjima.



Slika 19. Utjecaj temperature na čvrstoću i granicu razvlačenja za Č.4732 [3]

Prema tablici 8., mjerenjima se dobije brojka veoma blizu teoretskoj. Ona iznosi 1079,1 N/mm². No, uvjet od $\bar{\sigma} \approx 1000$ (N/mm²) nije zadovoljen tako da se ovaj čelik mora dodatno popuštati na 580°C.

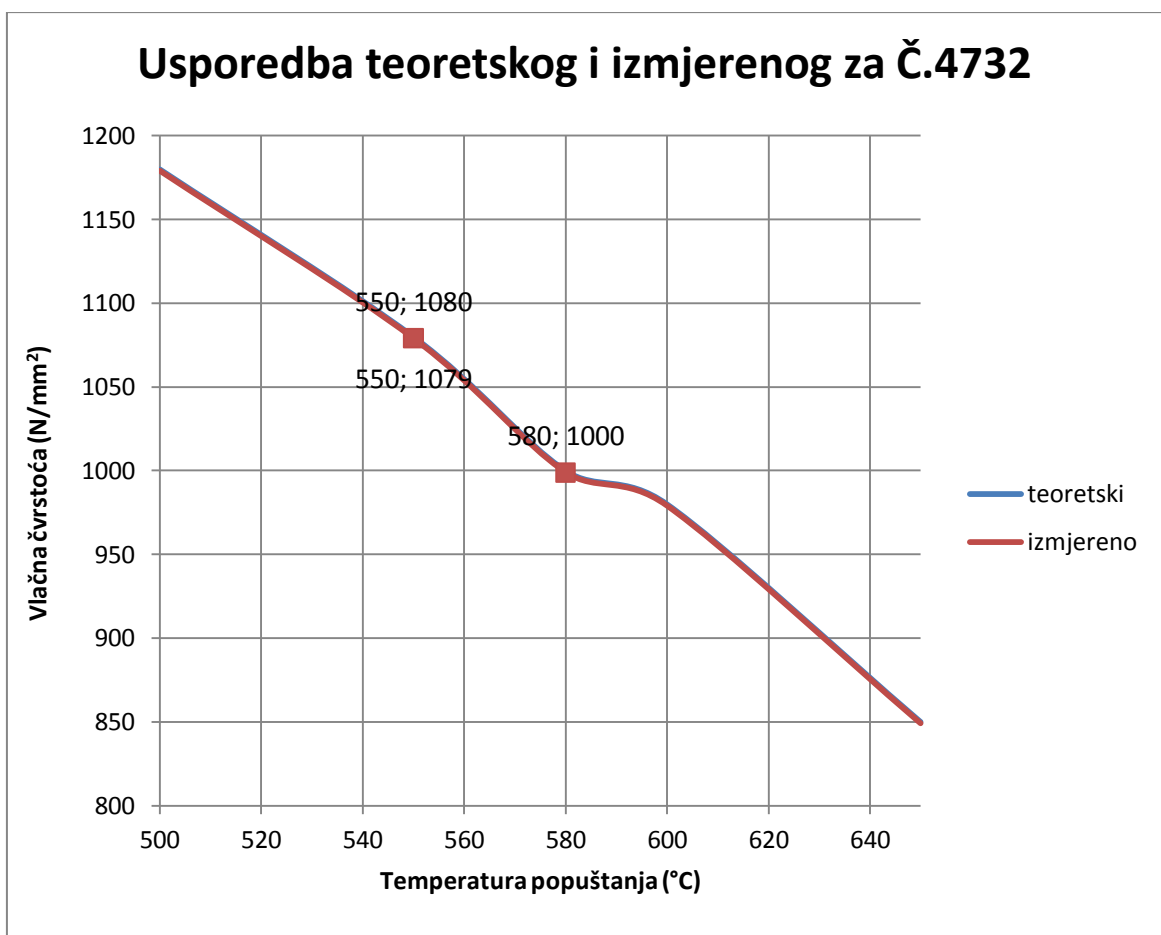
| Mjerenje | HB 2,5 | $\bar{\sigma}$ (N/mm ²) |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| 1 | 330 | 1079,1 |
| 2 | 329 | 1075,8 |
| 3 | 327 | 1069,3 |
| 4 | 325 | 1062,8 |
| 5 | 328 | 1072,6 |
| 6 | 330 | 1079,1 |
| 7 | 331 | 1082,4 |
| 8 | 333 | 1088,9 |
| 9 | 335 | 1095,5 |
| 10 | 332 | 1085,6 |
| \bar{x} | 330 | 1079,1 |

Tablica 8. Mjerenje za Č.4732 [3]

Uspoređene vrijednosti se slikovito prikazuju grafičkim prikazom. Na slici 20. se vidi da razlike skoro ni nema. Teoretska vrijednost je pokazana plavom bojom, a stvarno izmjerena crvenom. No, kako ni ovaj čelik ne zadovoljava uvjet $\bar{\sigma} \approx 1000$ (N/mm²), mora se dodatno popuštati na temperaturi od 580°C. Dodatnih 5 mjerenja za temperaturu od 580°C dokazuje da je uvjet zadovoljen.

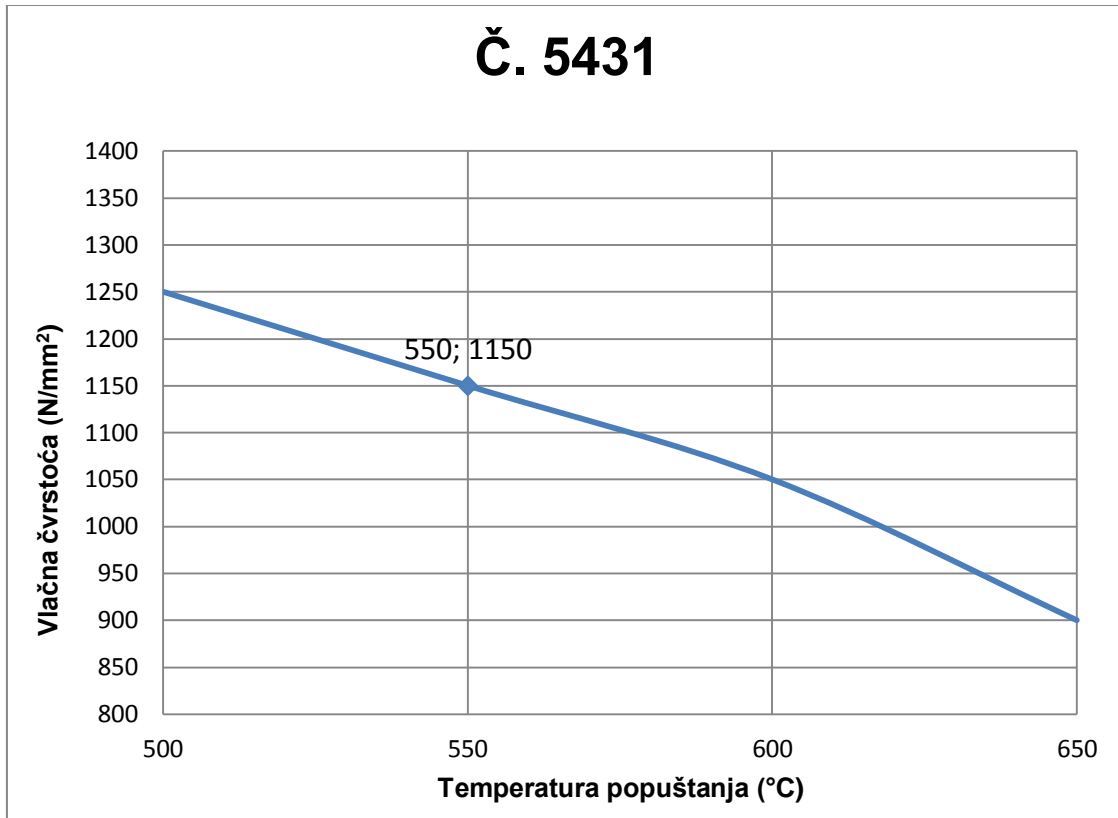
| Mjerenje | HB 2,5 | $\bar{\sigma}$ (N/mm ²) |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| 1 | 308 | 1007,1 |
| 2 | 307 | 1003,4 |
| 3 | 305 | 997,4 |
| 4 | 306 | 1000 |
| 5 | 304 | 994,1 |
| \bar{x} | 306 | 1000 |

Tablica 9. Drugo mjerenje za Č.4732



Slika 20. Usporedba teoretskog i izračunatog za Č.4732 [3]

Posljednji čelik ima zadanu vrijednost $\sigma \approx 1150$ (N/mm²). Radi se o čeliku Č.5431. Iz grafičkog prikaza (slika 21.) se očitava vrijednost od 1150 N/mm² pri temperaturi od 550°C.



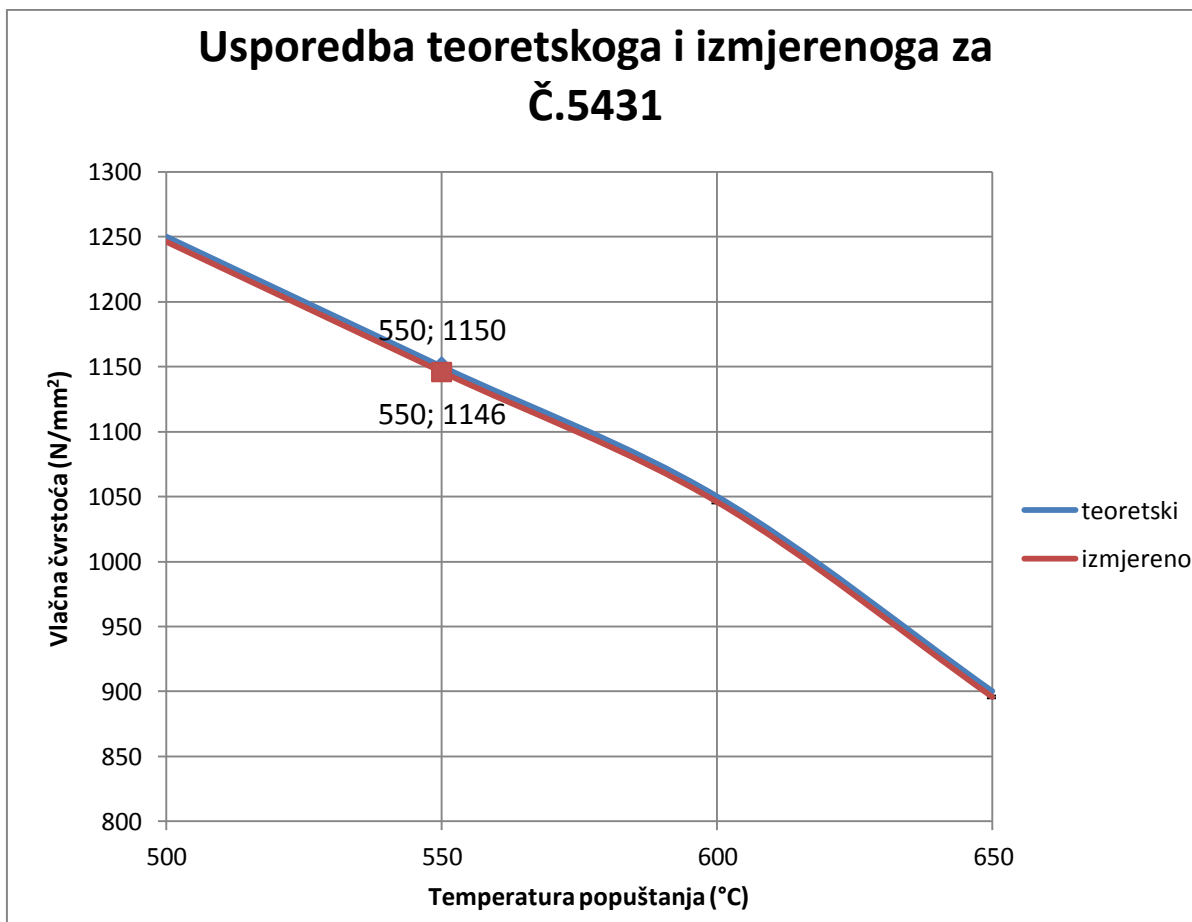
Slika 21. Utjecaj temperature na čvrstoću za Č.5431 [3]

Nadalje, mjerenjima se dobivaju vrijednosti koje su prikazane u tablici 10.

| Mjerenje | HB 2,5 | $\bar{\sigma}$ (N/mm ²) |
|-----------|--------|-------------------------------------|
| 1 | 351 | 1147,8 |
| 2 | 352 | 1151 |
| 3 | 353 | 1154,3 |
| 4 | 355 | 1160,9 |
| 5 | 352 | 1151 |
| 6 | 350 | 1144,5 |
| 7 | 348 | 1138 |
| 8 | 347 | 1134,7 |
| 9 | 348 | 1138 |
| 10 | 349 | 1141,2 |
| \bar{x} | 350,5 | 1146,2 |

Tablica 10. Mjerenje za Č.5431 [3]

Mjerenjem je dobivena veoma bliska vrijednost teoretskoj što se vidi na slici 22. Plava linija pokazuje teoretski izmjerenu vrijednost, a crvena stvarno dobivenu vrijednost mjerenjem. S ovim čelikom je zadani uvjet $\bar{\sigma} \approx 1150$ (N/mm²) zadovoljen jednim popuštanjem.

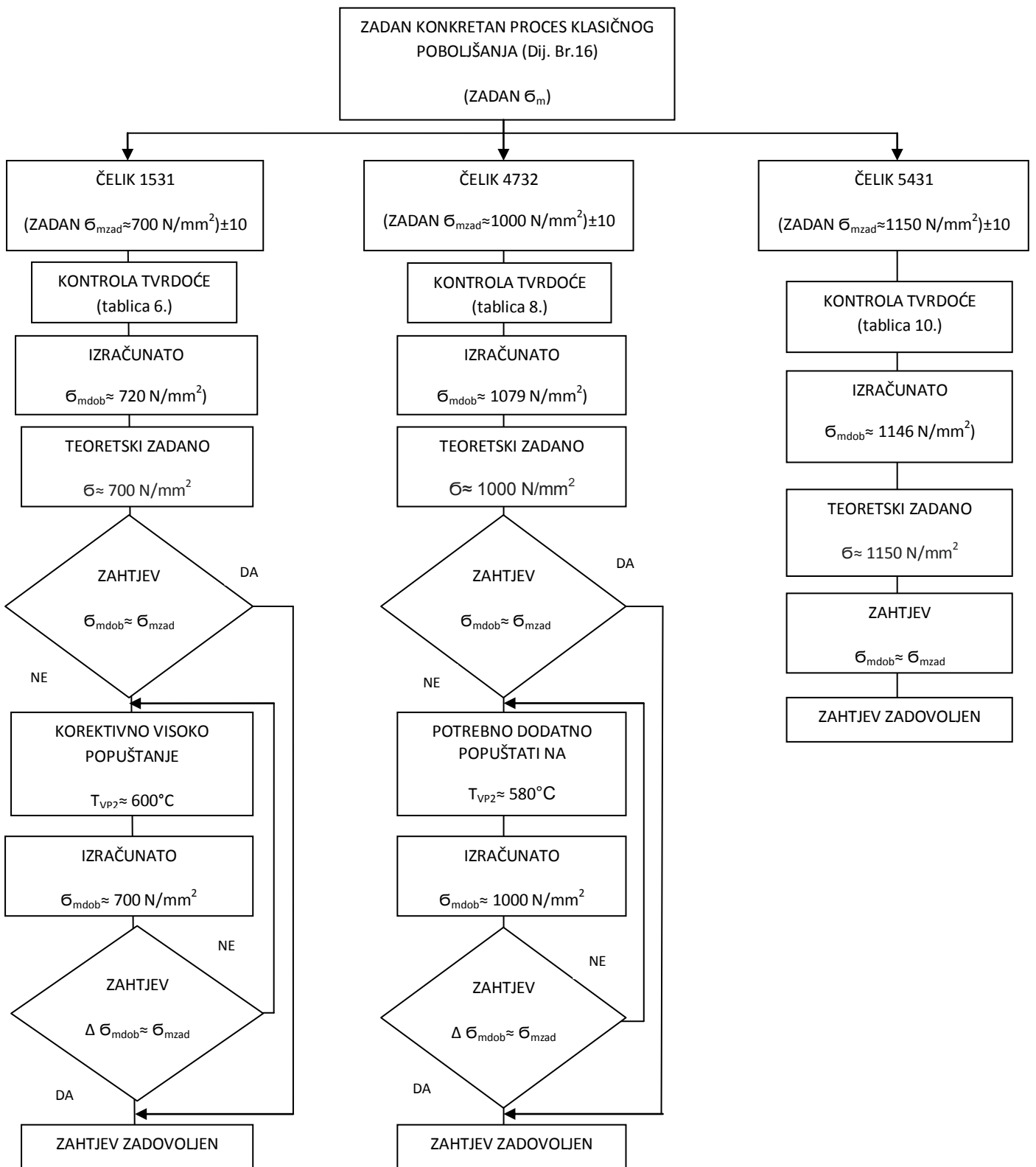


Slika 22. Usporedba teoretskog i izračunatog za Č.5431 [3]

Iz priloženih grafičkih prikaza i tablica se zaključuje da ova tri čelika mogu istodobno biti tretirani kroz zadani proces poboljšavanja, ali čelik 1531 i čelik 4732 moramo dodatno visoko popuštati.

6. ANALIZA REZULTATA

Zadanim procesom poboljšavanja tri vrste niskolegiranih konstrukcijskih čelika za poboljšavanje, te zadanim procesom poboljšavanja kao i uvjetima na čvrstoću, rezultati ispitivanja pokazuju da je jedan (Č.5431) od tri čelika zadovoljio zadane uvjete. Ostala dva čelika (Č.4732 i Č.1531) imaju rezultate koji zahtijevaju korektivnu toplinsku obradu. U konkretnom slučaju, zadani uvjeti čelika koji nisu zadovoljili rezultatima te su bili viši od zadanih, nužno je obaviti korektivno visoko popuštanje za svaki čelik posebno. Korekcijom visokotemperaturnog popuštanja za Č.1531 na temperaturu 600°C, a za Č.4732 na temperaturu 580°C zadani uvjeti su zadovoljeni te se ovako provedena toplinska obrada proglašava uspješnom. Blok dijagram (slika 23.) kompletnog procesa pokazuje tehnološki proces koji u konačnici daje rezultat zadovoljavajući sve zadane uvjete, te se kontrolom kvalitete ovako obrađeni materijali proglašava kvalitetnim i dozvoljava se puštati u sljedeću operaciju tehnološke kompozicije.



Slika 23. Rezultat eksperimentalnog dijela

7.ZAKLJUČAK

Odabrani materijali različiti po svom kemijskom sastavu, mogu se istodobno provesti kroz proces poboljšavanja uz nužne korektivne aktivnosti u fazi visokog popuštanja. Pozicioniranjem u lijevi donji dio željezo-uglik dijagrama za %C-a svakog od analiziranih čelika uočavamo da temperature austenitizacije su iste ili približno iste za sva tri čelika. Gašenje u ulju temperature 70°C također odgovara za sva tri čelika. Navedenim parametrima završavamo proces kaljenja. Proces poboljšavanja završava visokotemperaturnim popuštanjem na zadanoj temperaturi koja uz navedene korekcije daje rezultate kojim cjelokupni proces možemo proglasiti zadovoljavajućim te zaključiti da sva tri čelika različitog kemijskog sastava možemo istodobno provesti kroz proces poboljšavanja.

Analizirajući mjerenjima dobivene vrijednosti, bitno je da su sve izmjerene vrijednosti čvrstoće iznad propisanih te se u tom slučaju korekcijom visokotemperaturnog popuštanja zadovoljavaju postavljeni uvjeti. U slučaju da prilikom prvog visokotemperaturnog popuštanja vrijednosti čvrstoće budu ispod zadanih, tada proces u potpunosti moramo ponoviti uz prethodno sferoidizacijsko žarenje prije novog postupka.

POPIS OZNAKA

| SIMBOL | JEDINICA | ZNAČENJE |
|-----------------------|-----------------|---------------------------------------|
| σ | °C | Vlačna čvrstoća |
| t | s | vrijeme |
| T | °C | Temperatura toplinske obrade |
| $\sigma_{Mteoretski}$ | °C | Vlačna čvrstoća iščitana iz dijagrama |
| $\sigma_{Mdobiveno}$ | °C | Vlačna čvrstoća dobivena izračunom |
| T_{VP2} | °C | Temperatura visokog popuštanja |

LITERATURA

- [1] Kožuh, S.: Specijalni čelici – skripta, Sisak, 2010.
- [2] Božić T. : Nastavni materijal, Veleučilište u Karlovcu
- [3] Vlastita izrada
- [4] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala Intergrafika– FSB, 2006.

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Opća podjela čelika prema namjeni [1]..... | 6 |
| Slika 2. Dijagram stanja željezo – ugljik [1]..... | 7 |
| Slika 3. Visokopopušteni martenzit u mikrostrukтури poboljšanog čelika (mjerilo 500:1) [2] | 19 |
| Slika 4. Usporedba tvrdoće površinskog sloja toplinskim obradama [4] | 22 |
| Slika 5. Shematski prikaz folikula [1] | 23 |
| Slika 6. Dijagram žarenja velikih otkovaka [1] | 23 |
| Slika 7. Mehaničke osobine nelegiranih čelika u zavisnosti od sadržaja ugljika [2]..... | 28 |
| Slika 8. Dijagramski prikaz postupka toplinske obrade [2]..... | 29 |
| Slika 9. Konstrukcija TTT- dijagrama | 30 |
| Slika 10. Režim običnog postupka poboljšanja [2]..... | 34 |
| Slika 11. Režim poboljšanja u toploj kupki [2] | 35 |
| Slika 12. Režim međustupanjskog poboljšanja [2]..... | 37 |
| Slika 13. Shematski prikaz međustupanjskog poboljšanja u odnosu na TTT dijagram [2] | 38 |
| Slika 14. Promjena tvrdoće pri popuštanju izotermički transformiranog čelika [2] | 38 |
| Slika 15. Plan eksperimentalnog dijela..... | 40 |
| Slika 16. Dijagram postupka poboljšavanja | 41 |
| Slika 17. Utjecaj temperature na čvrstoću za Č.1531 [3] | 42 |
| Slika 18. Usporedba teoretskog i izračunatog za Č.1531 [3] | 44 |
| Slika 19. Utjecaj temperature na čvrstoću i granicu razvlačenja za Č.4732 [3] | 45 |
| Slika 20. Usporedba teoretskog i izračunatog za Č.4732 [3] | 47 |
| Slika 21. Utjecaj temperature na čvrstoću za Č.5431 [3] | 48 |
| Slika 22. Usporedba teoretskog i izračunatog za Č.5431 [3] | 50 |
| Slika 23. Rezultat eksperimentalnog dijela..... | 52 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika [1]..... | 10 |
| Tablica 2. Granični maseni udjeli elemenata (EN 10020) [1] | 13 |
| Tablica 3. Opća podjela konstrukcijskih čelika prema kemijskom sastavu [1] | 18 |
| Tablica 4. Kemijski sastav zadanih čelika [3] | 21 |
| Tablica 5. Temperature kaljenja i popuštanja [3] | 33 |
| Tablica 6. Mjerenje Č.1531 [3]..... | 43 |
| Tablica 7. Drugo mjerenje Č.1531 [3] | 44 |
| Tablica 8. Mjerenje za Č.4732 [3] | 46 |
| Tablica 9. Drugo mjerenje za Č.4732 | 47 |
| Tablica 10. Mjerenje za Č.5431 [3]..... | 49 |