

**,SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET**

TONI BILOKAPIĆ

**TOPLINSKA OBRADA ČELIKA: BRODSKI
DIJELOVI I KOMPONENTE**

DIPLOMSKI RAD

SPLIT, 2024.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET**

STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO

**TOPLINSKA OBRADA ČELIKA: BRODSKI
DIJELOVI I KOMPONENTE**

**ANALIZA TVRDOĆE I ČVRSTOĆE ČELIKA 42CrMo4 U IZVORNOM
STANJU I NAKON RAZLIČITIH TOPLINSKIH OBRADA**

DIPLOMSKI RAD

MENTOR:

prof. dr. sc. Liane Roldo

STUDENT:

Toni Bilokapić

(MB: 0023134749)

SPLIT, 2024.

ZAHVALE

Mnogi su ljudi pridonijeli u izradi završnoga rada i njegovom eksperimentalnom dijelu te svima njima dugujem zahvalu jer su mi pomogli da završni rad bude što uspješniji. Posebno zahvaljujem prof. dr. sc. Sonji Jozić sa zavoda za proizvodno strojarstvo FESB-a i ing. Čedi Periću s FESB-a na rezanju i izravnavanju uzoraka.

Zahvaljujem povjerenstvu za završni rad – prof. dr. sc. Nenadu Vuliću i prof. dr. sc. Zlatanu Kulenoviću na uloženoj vremenu i predanosti u analizi i davanju povratnih informacija.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Liane Roldo na aktivnom mentorstvu, kritikama, savjetima i informacijama koje su dovele do završetka i obrane ovoga rada.

I na kraju, ali ne manje važno, zahvaljujem svojoj sestri Vesni Samardžić na lekturi završnoga rada i savjetima kako da rad bude napisan u duhu hrvatskoga jezika.

SAŽETAK

Cilj je ovog diplomskog rada ispitati utjecaj različitih postupaka toplinske obrade na tvrdoću i čvrstoću čelika 42CrMo4 kako bi se identificirala optimalna toplinska obrada čelika namijenjenog za korištenje kao materijala međuvratila. Da bi se postigao ovaj cilj, uzeta je u obzir teorija i eksperimentalni postupci. Proveden je niz toplinskih obrada i ispitivanja tvrdoće, dok su rezultati vlačne čvrstoće dobiveni pomoću jednadžbe koja povezuje Brinellovu tvrdoću i vlačnu čvrstoću materijala. Istraživanja pokazuju da primjena postupaka toplinske obrade ima značajan utjecaj na tvrdoću i čvrstoću čelika. Nakon svih toplinskih obrada, vlačna čvrstoća zadovoljava zahtjeve izvornog uzorka i onog s toplinskom obradom žarenja.

Ključne riječi: *toplinska obrada, tvrdoća, vlačna čvrstoća, 42CrMo4.*

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to examine the influence of various heat treatment procedures on the hardness and strength of 42CrMo4 steel in order to identify the optimal heat treatment for a steel intended to manufacture an intermediate shaft from. To achieve this objective, the theory and experimental procedures were taken into consideration. A series of heat treatments and hardness tests were conducted, while the tensile strength results were obtained using an equation that relates Brinell hardness and the tensile strength of the material. The research demonstrate that the application of heat treatment procedures has a significant impact on the hardness and strength of steel. After all the heat treatments, the tensile strength already meets the requirements of the original sample and the one with the annealing heat treatment.

Keywords: *heat treatment, hardness, tensile strength, 42CrMo4.*

SADRŽAJ

UVOD	1
PREGLED LITERATURE	2
1.1. VRATILNI VOD.....	2
1.1.1. MEĐUVRATILO.....	2
1.1.2. ČELICI ZA IZRADU VRATILA	4
1.2. TOPLINSKA OBRADA.....	5
1.2.1. OKSIDACIJA I DEKARBURIZACIJA ČELIKA.....	8
1.2.2. ŽARENJE.....	9
1.2.3. NORMALIZACIJA	10
1.2.4. KALJENJE (ULJE, VODA).....	11
1.2.5. POPUŠTANJE	13
EKSPERIMENTALNI DIO.....	16
1.3. MATERIJAL	16
1.4. METODA	16
1.4.1. PRIPREMA UZORKA	16
1.4.2. TOPLINSKE OBRADU KOD ŠIPKE	17
1.4.3. TVRDOĆA I ČVRSTOĆA KOD ŠIPKE	20
REZULTATI I RASPRAVE.....	23
1.5. TOPLINSKA OBRADA.....	23
1.6. TVRDOĆA	24
1.7. ČVRSTOĆA U ODNOSU NA TVRDOĆU	30
ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA	36
POPIS SLIKA.....	38
POPIS TABLICA.....	40
POPIS KRATICA	41
PRILOG 1	42

UVOD

Čelik 42CrMo4, legirani čelik visoke čvrstoće, predstavlja jedan od najvažnijih materijala u industrijskoj proizvodnji brodskih dijelova i komponenti zbog svojih izvanrednih mehaničkih svojstava i otpornosti na habanje. Toplinska obrada, kao ključni proces u proizvodnji, igra presudnu ulogu u postizanju optimalnih performansi ovoga čelika, prilagođavajući njegova svojstva specifičnim zahtjevima primjene.

Brodogradnja, kao složena inženjerska disciplina, zahtijeva materijale koji mogu izdržati ekstremne uvjete rada, uključujući visoka naprezanja, korozivno okruženje i dinamička opterećenja. U tom kontekstu, toplinska obrada čelika 42CrMo4 omogućava postizanje željenih razina tvrdoće i čvrstoće što direktno utječe na pouzdanost i dugovječnost brodskih dijelova i komponenti.

Cilj je ovoga rada analizirati utjecaj različitih postupaka toplinske obrade na tvrdoću i čvrstoću čelika 42CrMo4 kako bi se utvrdile optimalne metode za postizanje željenih mehaničkih svojstava. Eksperimentalnim istraživanjem, koje obuhvaća usporedbu karakteristika materijala u izvornom stanju i nakon različitih toplinskih obrada, nastojat će se pružiti sveobuhvatno razumijevanje kako odabrane metode toplinske obrade utječu na performanse ovoga ključnog materijala u brodogradnji.

U teorijskome dijelu ovoga rada prikazane su osnovne toplinske obrade čelika kao što su: žarenje, normalizacija, kaljenje (uljem i vodom) i popuštanje (uljem i vodom). Također je opisan i vratilni vod uz dopuštena naprezanja, s naglaskom na međuvratilo.

Eksperimentalni je dio proveden na Pomorskom fakultetu u Splitu, gdje su se vršile toplinske obrade, kako bi mogli odrediti vlačnu čvrstoću uzoraka te na taj način prokomentirati rezultate.

Analizom rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće doneseni su zaključci o korisnosti primjene određene toplinske obrade na ovu vrstu čelika koji se često koristi u brodogradnji za izradu međuvratila.

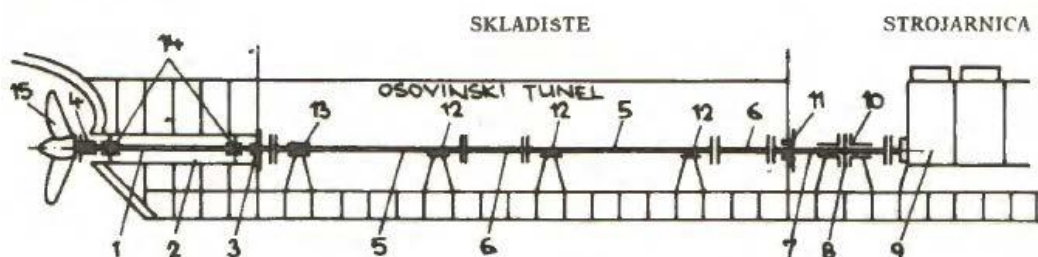
PREGLED LITERATURE

1.1. VRATILNI VOD

Vratilni vod povezuje pogonske strojeve i brodske vijke, a namjena mu je prijenos zakretnog momenta s porivnog stroja na brodski vijak te porivne sile s broskog vijka natrag na odrivni ležaj [1].

Vratilni se vod sastoji od vratilo broskog vijka, međuvratila i odrivnog vratila. Međuvratilo može biti jedno ili više, ovisno o veličini broda. Međuvratilo nose radijalni ležajevi dok vratilo broskog vijka nose statveni ležajevi, tj. radijalni ležajevi smješteni u krmenoj statvi [1].

Prilikom vrtnje broskog vijka i stvaranja porivne sile stvara se aksijalna sila koja se prenosi na vratilo broskog vijka i na čitav vratilni vod do odrivnog ležaja. Na prikladnom mjestu na vratilnom vodu ugrađuje se kraće odrivno vratilo koje porivnu silu prenosi preko odrivnog ležaja na konstrukciju broda. To je vratilo ugrađeno u posebno kućište, u koje se obično ugrađuje aksijalni ležaj (Michel-ov ležaj). Odrivni ležaj preuzima na sebe porivnu silu te tako štiti porivni stroj od nje. Na slici 1 prikazan je vratilni vod i njegovi dijelovi [1].



Slika 1. Vratilni vod i njegovi dijelovi [1].

Slika 1 prikazuje vratilni vod s pripadajućim dijelovima: vratilo broskog vijka (1), statvena cijev (2), prednja brtvenica (3), stražnja brtvenica (4), međuvratilo (5 i 6), odrivno vratilo (7), greben (8), porivni stoj (9), odrivni ležaj (10), pregradna brtvenica (11), ležaj međuvratila (12), brodski vijak (13), krmeni i pramčani statveni ležaj (14) [1].

1.1.1. MEĐUVRATILO

Ova se vratila izrađuju kovanjem ugljičnog ili ugljično-manganskog čelika pri čemu je minimalna vlačna čvrstoća u rasponu od 400 do 700 N/mm². Također se mogu koristiti i

legirani čelici ovisno o mehaničkim svojstvima materijala i njihovom kemijskom sastavu, a kod njih vlačna čvrstoća ne smije prelaziti granicu od 800 N/mm² [1],[3].

Promjer pojedinih vratila izračunava se pomoću formule (1) koja povezuje snagu koju razvija pogonski stroj, različite konstante i minimalnu vlačnu čvrstoću materijala koji se koristi. Ovaj izračun sukladan je s tehničkim pravilima klasifikacijskih društava članova IACS-a, imajući na umu da daje minimalni potrebni promjer [1].

$$d = F \cdot K \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^4} \cdot \frac{560}{Rm + 160}} \text{ [mm]} \quad (1)$$

Gdje su:

d_{\min} – minimalni potrebni promjer vratila (mm)

F – faktor za vrstu porivne instalacije ($F=100$ za sva vratila broskog vijka)

k – faktor za posebne konstrukcijske značajke vratila ($k=1,26$ za brodske vijke s klinom ili perom, $k=1,22$ za brodske vijke s prirubnicom ili konusom bez klina ili pera, i $k=1,15$ za dijelove vratila broskog vijka između prednjeg ruba stražnjeg statvenog ležaja i prednjeg ruba prednje brtvenice)

d_i – stvarni promjer provrta vratila – može se zanemariti kada je, $d_i \leq 0,4 d_o$

d_o – stvarni vanjski promjer vratila (mm)

P – nazivna trajna snaga koja se prenosi kroz osovinu propelera – gubici u zupčaničkim prijenosnicima i ležajevima se ne uzimaju u obzir (kW)

n – brzina vrtnje vratila pri nazivnoj snazi (min⁻¹)

σ_B – specificirana minimalna vlačna čvrstoća materijala propelerskog vratila (N/mm²).

Međuvratila se koriste za prijenos snage od porivnog stroja do zadnjeg vratila u sklopu i kao takva moraju biti oslonjena na ležajeve. Ovi se ležajevi također nazivaju nosivim ležajevima vratila. Vratilo može biti oslonjeno na jedan ili dva ležaja, ovisno o izvedbi. Ležajevi su potrebni za držanje vratila i preuzimanje njegovog opterećenja, kao i za održavanje zadovoljavajućeg položaja u poprečnom smjeru, određenog centracijom (postrojavanjem) vratilnog voda [1].

Duljina međuvratila za velike brodove kreće se od 5 do 7 m. Debljine prirubnica međuvratila, odrivne osovine i vratila broskog vijka moraju biti najmanje 0,2 promjera međuvratila ($0,2d$) [1].

1.1.2. ČELICI ZA IZRADU VRATILA

Najčešće korišteni čelici za izradu vratila ovise o primjeni, zahtjevima za čvrstoću, otpornost na koroziju, težinu i druge specifične zahtjeve. Međutim, nekoliko se čelika ističe kao popularni izbori zbog njihovih mehaničkih svojstava i raspoloživosti.

Primjeri čelika koji se koriste za izradu vratila:

AISI 316: Ovaj je nehrđajući čelik često korišten za vratila koja će biti izložena morskoj vodi ili drugim agresivnim okruženjima. AISI 316 nudi visoku otpornost na koroziju, kiselinske spojeve i kloride što ga čini prikladnim za brodska vratila i druge primjene [4],[5].

EN S275JR: Pogodan za vratila koja nisu izložena ekstremnim opterećenjima ili visokim brzinama. To mogu biti vratila za manje mehaničke sustave ili za građevinske strojeve. Ako se koristi u korozivnim okruženjima, preporučuje se dodatna površinska zaštita (kao što je galvanizacija ili premazivanje) kako bi se produžio vijek trajanja vratila [4],[5].

EN S355JR: Odličan izbor za izradu vratila u primjenama koje zahtijevaju visoku čvrstoću. U usporedbi s S275JR, pruža bolja mehanička svojstva što ga čini pogodnim za zahtjevnije primjene. Dobro se obrađuje i ima dobru zavarljivost, što je korisno za precizne proizvodne procese [4],[5].

Primjeri čelika koji se koriste za izradu međuvratila:

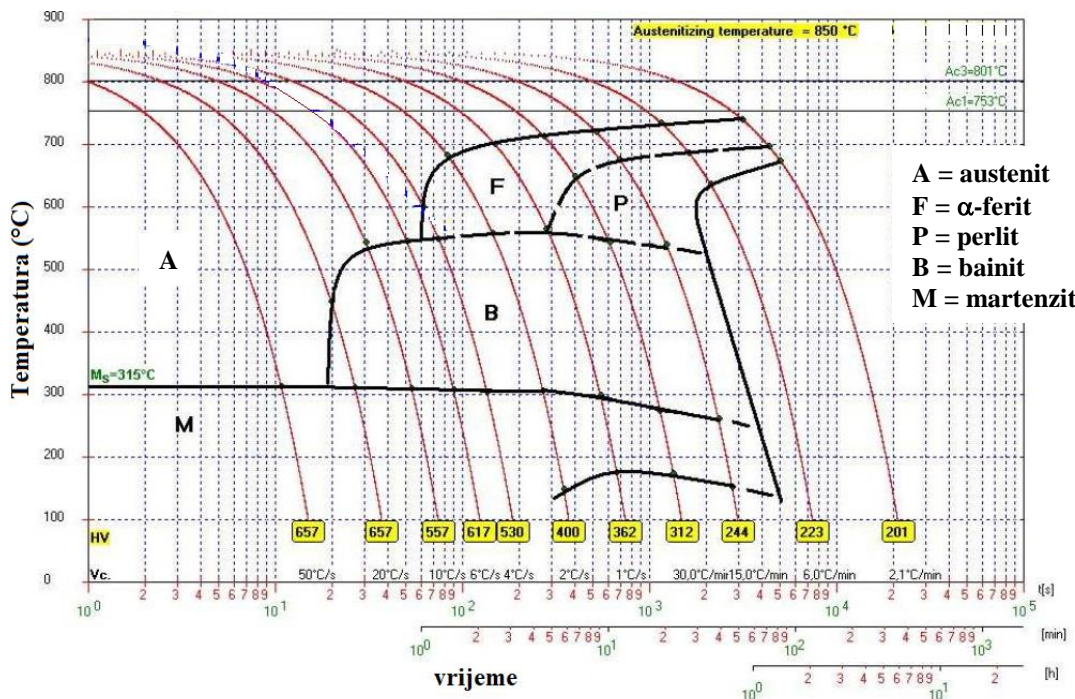
AISI 1045/EN C45 (1.0503): Čelik AISI 1045, također poznat kao SAE-AISI 1045, popularan je čelik sa srednjim ugljičnim sadržajem (0,42 - 0,5% C) koji se često koristi za izradu međuvratila. On nudi dobru obradivost, čvrstoću i otpornost na habanje te je često ekonomičan izbor za mnoge primjene [6].

AISI 4340/EN 34CrNiMo6: Još jedan legirani čelik, AISI 4340, također je popularan izbor za međuvratila zbog svoje visoke čvrstoće i tvrdoće. Ovaj čelik također nudi dobru otpornost na zamor materijala što ga čini prikladnim za primjene koje podrazumijevaju visoka dinamička opterećenja [6].

AISI 4140/EN 42CrMo4: Ovaj legirani čelik popularan je izbor za međuvratila zbog svoje visoke čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na habanje. Međuvratila izrađena od AISI 4140 čelika obično imaju dobra mehanička svojstva i mogu se koristiti u različitim primjenama, uključujući strojeve, automobilsku industriju i za izradu brodskih međuvratila. Kemijski sastav sastoji se od 0,38-0,43 %C, 0,75–1 %Mn, do 0,035 %P, do 0,04 %S, 0,15-0,3 %Si, 0,8-1,1 %Cr, 0,15-0,25 %Mo za 4140H. Ako materijal ima specifična svojstva, kao što je tvrdoća iznad prosjeka, postaje toplinski obradivim i nosi naziv 4140H [7].

Ovaj je čelik među najčešće korištenim srednje ugljičnim čelicima. Relativno je jeftin s obzirom na relativno visoku mogućnost očvršćavanja. Potpuno otvrdnuti 42CrMo4/Č.4732 (kod kaljenja) postiže površinsku tvrdoću od oko 54 do 59 HRC, ovisno o sadržaju ugljika. Mogućnost kovanja je vrlo dobra, ali zavarljivost je loša zbog osjetljivosti od nastajanja pukotina [7, 8]. Tvrdoća površine nakon kaljenja može doseći 60 HRC [7].

Kako bismo pojasnili razliku u tvrdoći između uzoraka čelika EN 42CrMo/AISI 4140 nakon toplinske obrade, slika 2 prikazuje dijagram kontinuiranog hlađenja – CCT (eng. Continuous Cooling Transformation) navedenog čelika [9].



Slika 2. Dijagram kontinuiranog hlađenja čelika EN 42CrMo4. [9]

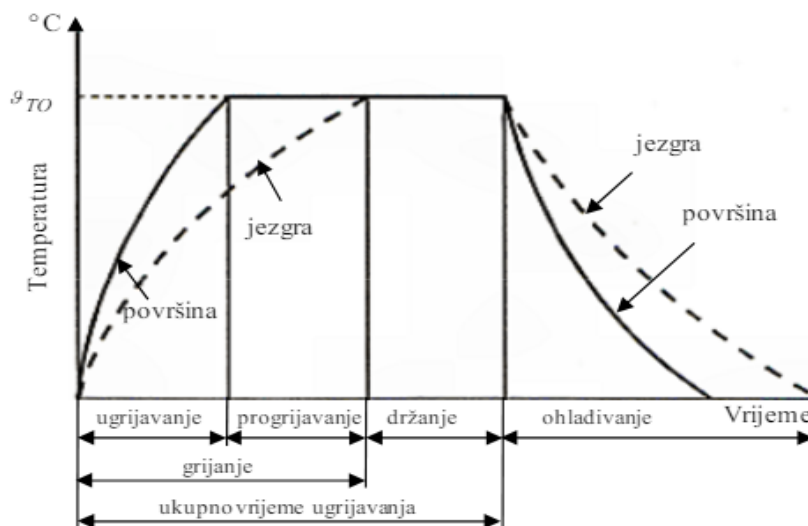
1.2. TOPLINSKA OBRADA

Metali bez imalo dodataka imaju nisku čvrstoću pa se zato ne koriste u mehaničkim konstrukcijama. Zato umjesto njih koristimo materijale koji su u obliku legura odnosno slitina koji zbog promjene mikrostruktura dobivaju mnogo povoljnija mehanička svojstva. Najveće promjene mehaničkih svojstava i povećanja čvrstoće postižu se primjenom toplinskih obrada. Glavni su parametri kod toplinskih obrada temperatura i trajanje procesa.

Toplinska obradba metala obuhvaća cijeli niz postupaka zagrijavanja i hlađenja koji se primjenjuju pri izradi različitih alata i drugih dijelova strojeva s ciljem dobivanja željenih mehaničkih svojstava dotičnog predmeta - obratka.

Tijekom tih postupaka legura se u krutom stanju izvrgava djelovanju niza temperaturno-vremenskih promjena sa svrhom promjena strukture, a time i promjene svojstva u željenom smislu. Proces toplinske obradbe obuhvaćaju žarenje, kaljenje, popuštanje, poboljšavanje te površinska otvrdnjavanja [10].

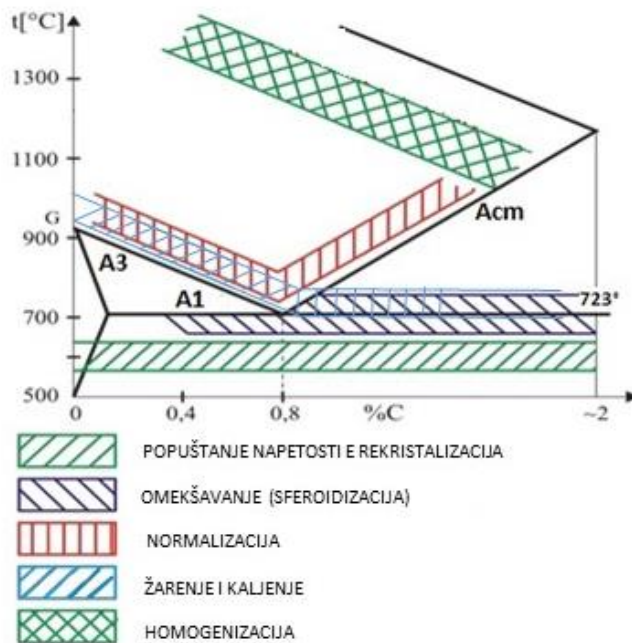
Opći postupak svakog vida toplinske obrade može se opisati dijagramom ovisnosti promjene temperature o vremenu (trajanju). Taj dijagram $\vartheta = f(t)$, prikazan na slici 3, naziva se shematski prikaz ciklusa toplinske obrade.



Slika 3. Shematski prikaz ciklusa toplinske obrade [10].

Iz dijagrama na slici 2 vidi se da će se u općem slučaju u fazi ugrijavanja uspostaviti temperaturna razlika između površine predmeta i njegove unutrašnjosti tj. jezgre. Ta će razlika biti tim veća što je veća brzina ugrijavanja, što je veći volumen (masa) grijanog predmeta, što je niži koeficijent toplinske vodljivosti itd.

Postupci toplinske obrade čelika i njihova temperaturna područja pregledno su prikazani u okviru Fe-Fe₃C dijagrama prikazanoga na slici 4.



Slika 4. Shema faznog dijagrama željezo-željezni karbid, koja pokazuje raspon temperature toplinske obrade čelika [11].

Odgovarajuće vrste toplinske obrade:

Rekristalizacija (rekristalizacijsko žarenje): metal se grije ispod austenitizacije i drži se neko vrijeme na toj temperaturi, a potom se sporo hladi. To je žarenje za redukciju zaostalih napetosti nakon obrade deformacijom [12].

Meko žarenje (sferoidizacija): Ovo je proces kojim se materijal zagrijava na temperaturu ispod zona rekristalizacije radi smanjenja čvrstoće i povećanja duktilnosti. Meko se žarenje često koristi nakon hladnog oblikovanja metala kako bi se smanjila krhkost i olakšalo daljnje oblikovanje ili obrada [12].

Normalizacija (normalizacijsko žarenje): Materijal se zagrijava od 30 do 50°C iznad A3 i Ac_m, zatim se drži na toj temperaturi do potpune austenitizacije i na kraju se hladi na zraku [12].

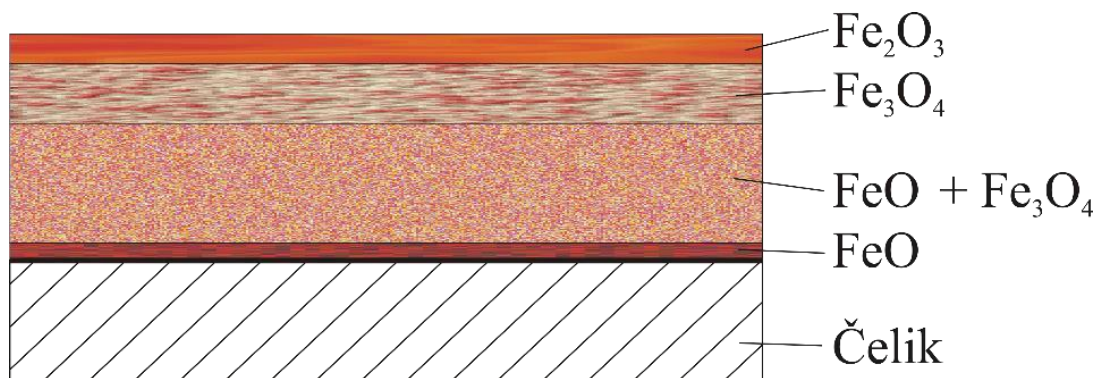
Žarenje (potpuno žarenje): Ovaj se proces koristi za poboljšanje homogenosti sastava materijala, posebno legura. Materijal se zagrijava na temperaturu na kojoj se potiče difuzija atoma ili molekula materijala što dovodi do bolje raspodjele legirajućih elemenata i smanjenja neželjenih koncentracijskih gradijenata [11],[12].

Kaljenje: Postupak kaljenja sastoji se od grijanja na temperaturu austenitizacije, progrijavanja (držanja na temperaturi austenitizacije) i hlađenja velikom brzinom – gašenja [12].

Homogenizacija: Ovo je proces kojim se materijal zagrijava na temperaturu ispod zona taljenja, ali dovoljno visoku da se potakne rekristalizacija kristalnih zrna. Rekristalizacija rezultira stvaranjem novih, manjih kristalnih zrna koja su oslobođena zaostalih naprezanja. Ovaj postupak poboljšava svojstva materijala poput mekoće, obradivosti i otpornosti na zamor [12].

1.2.1. OKSIDACIJA I DEKARBURIZACIJA ČELIKA

Oksidacija se odnosi na reakciju čelika s kisikom, pri čemu se na površini metala formira sloj oksida. Ovaj proces može nastati tijekom različitih faza proizvodnje i obrade čelika, posebno pri visokim temperaturama. Kada su čelici niskolegirani ili ugljični, kod visokih temperatura dolazi do stvaranja debelih slojeva oksida. Na visokim temperaturama prvo dolazi do pada količine ugljika na površini čelika (ugljik je povezan s kisikom). Na takvoj željeznoj površini dolazi do stvaranja oksidnih slojeva od kojih je FeO uz samu površinu metala. Iznad tog sloja dolazi do slojeva bogatijih kisikom Fe₂O₃ i Fe₃O₄. Ta dva sloja su veće debljine te se ljušte i zbog toga dolazi do gubitka materijala. Ova je pojava naročito jaka kod toplinskih obrada te zbog toga, ako smo u mogućnosti, primjenjujemo neutralnu atmosferu u pećima. Na slici 5 prikazano je nastajanje oksidnih slojeva na površini čelika [11].



Slika 5. Nastajanje oksidnih slojeva na površini čelika [11].

Dekarburizacija je proces gubitka ugljika s površine čelika, obično uzrokovan reakcijom između ugljika u čeliku i oksidirajuće atmosfere pri visokim temperaturama. Čimbenici koji doprinose su visoke temperature i velike količine kisika u atmosferi. Na višim temperaturama, brzina difuzije ugljika je toliko velika da duža vremena žarenja dovode do dekarburizacije. Ovdje atomi ugljika migriraju iz vanjskog sloja na površinu i tamo oksidiraju u CO ili CO₂ koji su hlapljivi plinovi i stoga dopuštaju ugljiku da pobjegne s površine. Dekarburizacija može imati negativne učinke na mehanička svojstva čelika

uključujući smanjenje tvrdoće i čvrstoće površinskog sloja. Kako bi se smanjila dekarburizacija, često se koriste zaštitne atmosfere ili prevlake koje sprječavaju kontakt čelika s oksidirajućim plinovima [13].

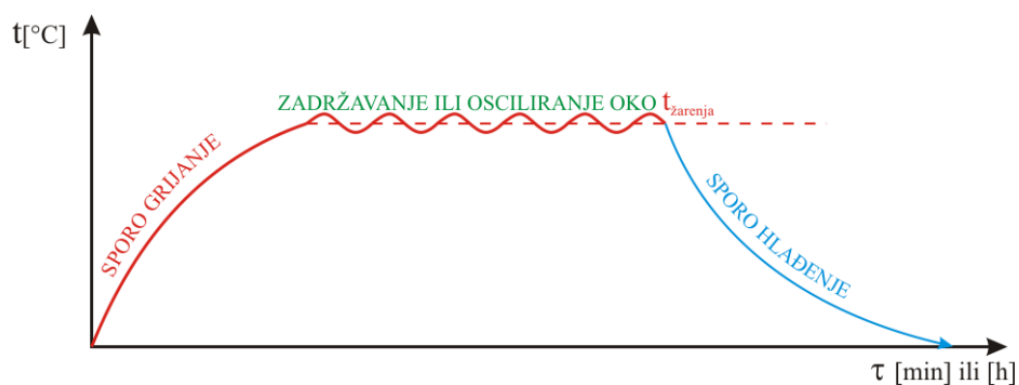
1.2.2. ŽARENJE

Toplinska obrada žarenja postupak je koji se koristi u metalurgiji kako bi se promijenila mikrostruktura metala ili legure. Ovaj proces uključuje zagrijavanje materijala na određenu temperaturu, zadržavanje na toj temperaturi određeno vrijeme, a zatim kontrolirano hlađenje [14].

Glavni su ciljevi toplinske obrade žarenja smanjenje zaostalih naprezanja, poboljšanje mehaničkih svojstava materijala (kao što su čvrstoća i duktilnost), poboljšanje obradivosti metala ili legure te uklanjanje ili smanjenje neželjenih mikrostruktura ili defekata koji su nastali tijekom prethodnih procesa obrade [11].

Primjeri tipova žarenja uključuju normalizaciju, rekristalizacijsko žarenje, difuzijsko žarenje, meko žarenje, i starenje, od kojih svaki ima specifične karakteristike i primjene ovisno o materijalu i željenim svojstvima [11].

Postupak žarenja, prikazan na slici 6, sastoji se od: sporog zagrijavanja do određene temperature, zadržavanja na toj temperaturi (trajanje ovisi o veličini presjeka izratka) ili osciliranja oko temperature žarenja i sporog hlađenja do okolne temperature [11].



Slika 6. Dijagram toplinske obrade žarenja [11].

Brzina hlađenja nakon žarenja mora biti podešena prema svojstvima čelika. Kod legiranih čelika, kod kojih su linije pretvorba u TTT-dijagramu pomaknute udesno prema višim vremenima, hlađenje mora biti izrazito sporo kako se izradak ne bi zakalio [14].

Postupak žarenja bira se u ovisnosti o početnom stanju (fazama i strukturi). Pri odabiru postupka treba voditi računa o tome da se povećanjem temperature žarenja povećava

trošak energije, radnog vremena, opreme, a povećava se i opasnost od oksidacije i razugljičenja površine izratka [11].

1.2.3. NORMALIZACIJA

Normalizacija se može uvrstiti u skupinu toplinskih obrada sporim hlađenjem. Međutim, u ovom radu bavit ćemo se srednjim hlađenjem u zraku, tj. hlađenjem između sporog hlađenja – žarenja i brzog hlađenja – kaljenja.

Toplinska obrada normalizacije je postupak toplinske obrade koji se koristi za poboljšanje mehaničkih svojstava metala, posebno čelika. Glavni cilj normalizacije je smanjenje zaostalih naprezanja u materijalu i postizanje homogenije mikrostrukture [11].

Ovo je postupak kojim se materijal zagrijava iznad zona rekristalizacije, zatim se drži na toj temperaturi kako bi se postigla homogenizacija mikrostrukture, te se na kraju kontrolirano hladi na zraku. Normalizacija se obično koristi za uklanjanje zaostalih naprezanja koja su nastala tijekom prethodnih procesa obrade ili zavarivanja. U usporedbi s žarenjem, ovaj proces također poboljšava mehanička svojstva materijala kao što su tvrdoća i čvrstoća [12].

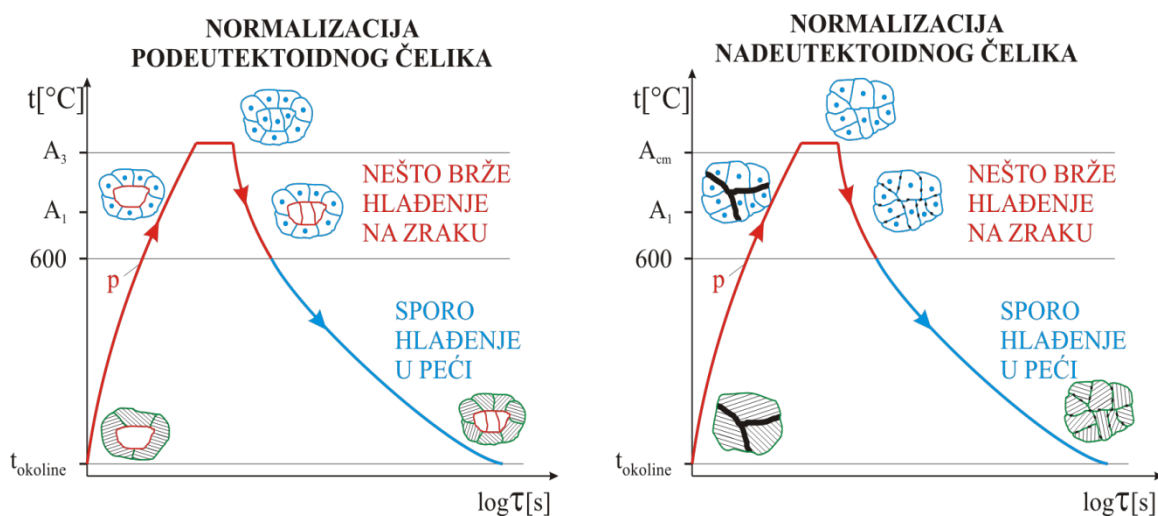
Kod zagrijavanja, zagrijava se iznad zona kritične temperature koja je temperatura na kojoj se formiraju austenitne kristalne strukture. Ova temperatura ovisi o vrsti čelika i može varirati. Nakon što se postigne kritična temperatura, materijal se drži na toj temperaturi određeno vrijeme kako bi se osigurala potpuna transformacija mikrostrukture u austenitnu fazu. Vrijeme držanja ovisi o debljini i vrsti materijala. Nakon držanja na temperaturi, materijal se kontrolirano hladi na zraku. Ovaj proces omogućuje rekristalizaciju austenitne faze i formiranje nove mikrostrukture [15].

Normalizacija se obično koristi nakon procesa kao što su lijevanje, kovanje ili termičko rezanje kako bi se smanjila zaostala naprezanja koja su nastala tijekom tih postupaka. Također se koristi za poboljšanje obradivosti materijala i postizanje homogenije mikrostrukture [11].

Prednosti normalizacije uključuju poboljšanje mehaničkih svojstava materijala, kao što su čvrstoća i duktilnost, te smanjenje rizika od pojave neželjenih mikrostrukturnih promjena. Ovaj postupak često rezultira finijom i homogenijom mikrostrukturom u usporedbi s drugim toplinskim obradama poput rekristalizacijskog žarenja [15].

Sam postupak toplinske obrade normalizacije (slika 7) obavlja se zagrijavanjem nešto iznad A3 temperature za podeutektoidne, odnosno iznad Acm za nadeutektoidne

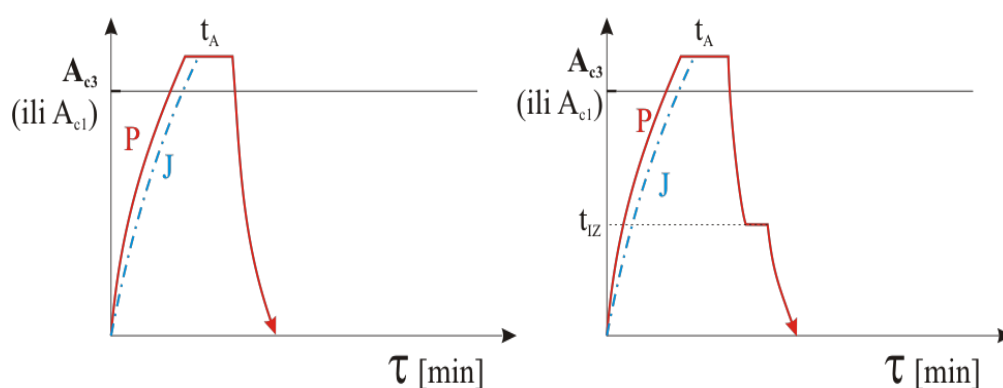
čelike, zadržavanjem toliko dugo dok se ne izvrši potpuna austenitizacija, a zatim nešto bržeg hlađenja, npr. na zraku do 600°C, kako bi se izbjegao porast zrna [11].



Slika 7. Postupak toplinske obrade normalizacije [11].

1.2.4. KALJENJE (ULJE, VODA)

Ovom se toplinskom obradom čelik udaljava od ravnotežnog stanja, bilo kontinuiranim hlađenjem austenita povećanom brzinom hlađenja do sobne temperature ili diskontinuirano, tj. pothlađenjem na neku temperaturu ispod (723 °C u metastabilnom dijagramu), zadržavanjem određeno vrijeme na toj temperaturi i zatim hlađenjem dalje do sobne temperature (slika 8).



Slika 8. Postupak toplinske obrade kaljenja [11].

Toplinska obrada kaljenja je postupak koji se koristi u metalurgiji kako bi se poboljšala tvrdoća i čvrstoća čelika. Ovaj proces uključuje zagrijavanje materijala na visoku temperaturu, zatim naglo hlađenje radi brzog oblikovanja martenzitne strukture čime se

postiže visoka tvrdoća. Kod kaljenja prvo zagrijavamo materijal, a zatim ga držimo na određenoj temperaturi te se hladi [16].

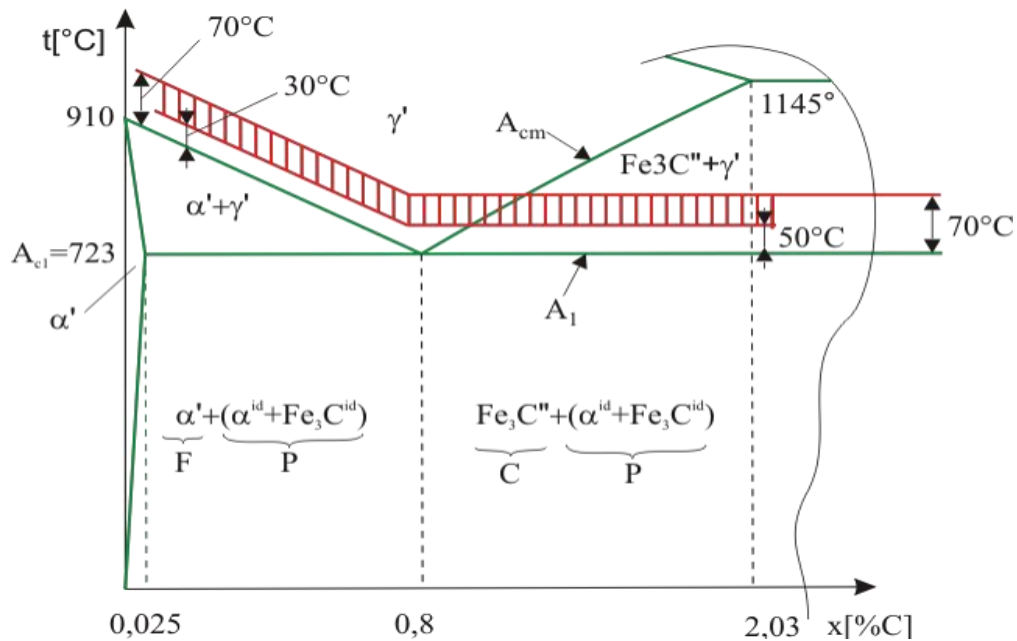
Kaljenje ima za cilj dobivanje martenzita, sprječavanje difuzije otopljenog ugljika u kristalnoj rešetki željeza te stvaranje jako izvitoperene prostorno centrirane tetragonske rešetke (body-centered tetragonal (bct) lattice) čije se unutarnje napetosti manifestiraju u porastu tvrdoće i mehaničke čvrstoće (granica tečenja i vlačna čvrstoća), uz smanjenje žilavosti i duktilnosti [11] [12].

Materijal se zagrijava na temperaturu iznad zone kritične temperature (od 30 do 70 °C iznad A3 ili A1), što je temperatura na kojoj se austenitna faza formira u čeliku. Ova temperatura ovisi o vrsti čelika i njegovom kemijskom sastavu. Nakon postizanja kritične temperature, materijal se drži na toj temperaturi određeno vrijeme kako bi se osigurala potpuna transformacija mikrostrukture u austenitnu fazu. Vrijeme držanja ovisi o debljini materijala i željenim svojstvima. Nakon držanja na temperaturi, materijal se naglo hladi, obično uranjanjem u rashladno sredstvo poput ulja, vode ili zraka. Naglo hlađenje dovodi do brzog oblikovanja martenzitne strukture koja je karakterizirana visokom tvrdoćom (maksimalna tvrdoća čelika s više od 0,7% C je 67 HRC) [11] [12].

Nakon kaljenja, čelik može postati izuzetno tvrd, ali istovremeno i krhak. Stoga se često provodi dodatna toplinska obrada, poput popuštanja, kako bi se smanjila krhkost i poboljšala točkasta elastičnost materijala. Popuštanje uključuje zagrijavanje kaljenog materijala na nižu temperaturu što rezultira smanjenjem tvrdoće i povećanjem duktilnosti, ali i zadržavanjem određene razine čvrstoće [16].

Prednosti toplinske obrade kaljenja uključuju postizanje visoke tvrdoće i čvrstoće čelika što ga čini pogodnim za primjene gdje su potrebni materijali otporni na trošenje i habanje. Međutim, važno je uzeti u obzir i mogućnost pojave zaostalih naprezanja i deformacija koje mogu nastati tijekom kaljenja što može zahtijevati dodatne postupke obrade kako bi se minimizirali ti nedostaci [11].

Ako se radi praktično o nelegiranim čelicima, područje pravilne temperature austenitizacije t_A može se prikazati u Fe-Fe₃C dijagramu na slici 9. [11].



Slika 9. Izbor pravilne temperature kaljenja [11].

1.2.5. POPUŠTANJE

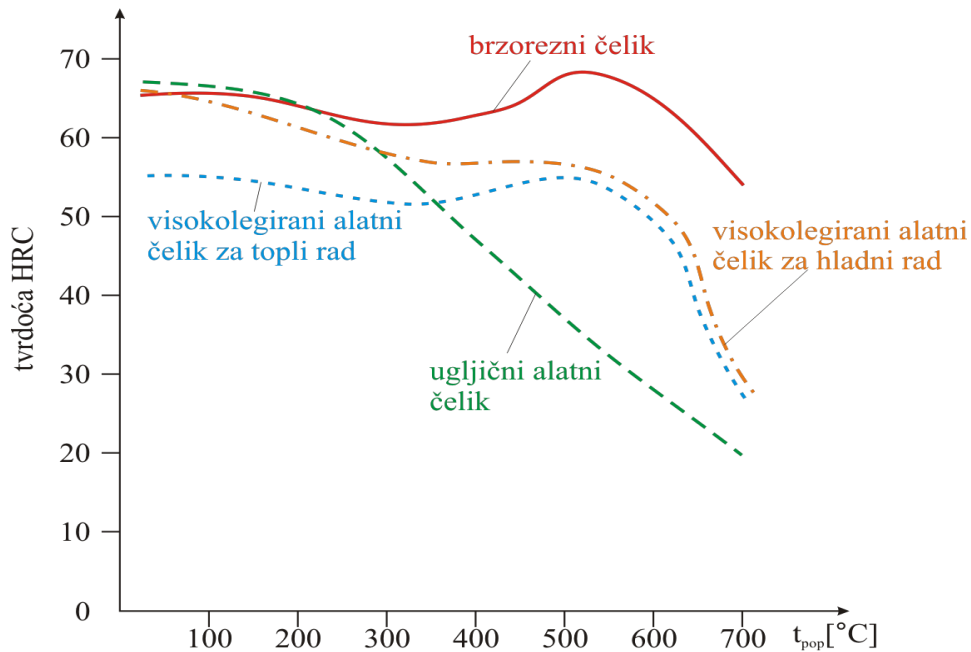
Toplinska obrada popuštanja proces je koji se primjenjuje na metalne dijelove nakon kaljenja kako bi se smanjila zaostala naprezanja i poboljšala mehanička svojstva materijala. Nakon kaljenja, metal može postati izuzetno krhak zbog visokih zaostalih naprezanja koja su nastala tijekom procesa hlađenja. Popuštanje se koristi kako bi se smanjila ova krhkost i poboljšala druge svojstva materijala [11], [12].

Proces popuštanja uključuje zagrijavanje kaljenog metala na umjerenoj temperaturi koja je ispod kritične temperature transformacije metala. Metal se zatim drži na toj temperaturi određeno vrijeme, obično nekoliko sati, kako bi se omogućilo popuštanje zaostalih naprezanja. Tokom ovog procesa, atomi metala redistribuiraju se u kristalnoj rešetki, smanjujući naprezanja i poboljšavajući mehanička svojstva, kao što su vlačna čvrstoća i otpornost na udarce.

Također, tijekom popuštanja dolazi do promjena u strukturi martenzita iz prostorno centrirane tetragonske rešetke (bct) u prostorno centriranu kubnu rešetku (α -ferit) i cementit - Fe_3C [12].

Toplinska obrada popuštanja često se primjenjuje u industriji kako bi se postigla optimalna kombinacija čvrstoće, tvrdoće i duktilnosti u metalnim komponentama, kao što su alati, opruge, osovine i drugi dijelovi koji zahtijevaju visoku izdržljivost uz određenu fleksibilnost [11].

Na slici 10 prikazan je dijagram popuštanja različitih čelika.

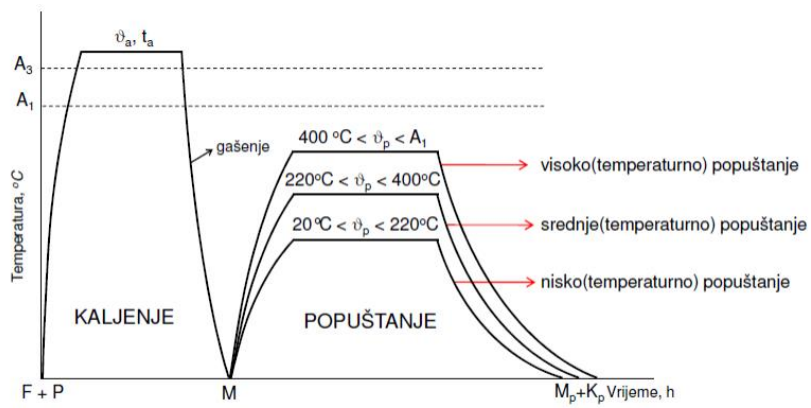


Slika 10. Dijagram popuštanja različitih čelika [11].

Ovisno o temperaturi postupci obrade popuštanja dijele se na:

- visoko temperaturno popuštanje: < 220 °C
- srednje temperaturno popuštanje: između 220 °C i 400°C
- nisko temperaturno popuštanje: više od 400°C niže od temperature austenitizacije [8].

Slika 10 prikazuje primjer postupka toplinske obrade čelika kaljenjem i popuštanjem. Kao što je prikazano na slici 11, kaljenje se događa iznad A1 ili A3 što uvelike ovisi o količini ugljika prisutnog u čeliku. Temperatura kaljenja i popuštanja koja će se koristiti ovisi o kemijskom sastavu čelika i željenim svojstvima konačnog proizvoda, kao što su tvrdoća, čvrstoća, duktilnost i žilavost [12].



Slika 11. Primjeri toplinske obrade čelika kaljenjem i popuštanjem [18].

EKSPERIMENTALNI DIO

1.3. MATERIJAL

U ovom radu bavimo se materijalom za izradu međuvratila u brodskom vratilnom vodu. Radi se o čeliku koji ima naziv 4140 (AISI), 42CrMo4 (EN). To je krom-molibdenski čelik za poboljšanje koji ima kemijski sastav prikazan u tablici 1.

Oznaka materijala "42CrMo4+A+C" oznaka je materijala koja prema europskom sustavu označavanja čelika označava legirani čelik s visokim udjelom kroma (Cr) i molibdena (Mo) te umjerenim udjelom ugljika (C). Slovo "A" obično označava da je čelik isporučen u poboljšanom stanju čvrstoće, a slovo "C" označava da je čelik isporučen u poboljšanom stanju čvrstoće i obradivosti. "+A" znači da je žareno, a "+C" da su hladno obrađivani čelici [19].

Tablica 1. Kemijski sastav čelika 42CrMo4/Č.4732 (Prilog 1).

Kemijski sastav u %:						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,43	0,26	0,78	0,011	0,030	1,14	0,186

1.4. METODA

1.4.1. PRIPREMA UZORKA

Početu šipku poslali smo na Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu (FESB) kako bi nam razrezali šipku na 6 jednakih dijelova kako bismo odradili sve toplinske obrade koje smo željeli.

Uzorke je bilo potrebno dodatno obrađivati s obzirom da površina nije bila dovoljno glatka za mjerenje tvrdoće i za toplinske obrade.

To smo radili na način da smo obradak brusili pomoću brusnog papira različitih hrapavosti (granulacije). Prvo smo koristili brusni papir hrapavosti P180, te smo brusili obradak 3 – 5 min na način da nismo upirali prejako kako ne bismo dodatno ohrapavili materijal.

Nakon brušenja s brusnim papirom hrapavosti P180, prešli smo na P320, ali na način da smo zarotirali uzorak za 90 stupnjeva kako bismo po odrazima crta pratili napredak našeg

brušenja te smo to radili također 3 – 5 min, odnosno dok više ne bismo vidjeli prethodne crte od brušenja sa P180.

Na kraju smo radili završno brušenje s brusnim papirom hrapavosti P400 istim procesom.

Važno je naglasti da se obradak tijekom brušenja trebao često čistiti kako čestice ne bi dodatno naštetile obratku, a to smo radili na način da bi obradak polili s malo alkohola te zatim lagano obrisali bez prevelikog pritiska.

Na slici 12 prikazan je uzorak šipke debljine 11 mm i promjera 40 mm koju smo toplinski obrađivali.



Slika 12. Uzorak šipke debljine 11mm i promjera 40 mm.

1.4.2. TOPLINSKE OBRADNE KOD ŠIPKE

Kod eksperimentalnog dijela, testirali smo ponašanje materijala odnosno promjene svojstava materijala nakon različitih toplinskih obrada kod šipke kao što su žarenje, normalizacija, kaljenje vodom i uljem te popuštanje.

Prema Heat Treater's Guide [7], temperatura austenitizacije varira između 845°C i 855°C. Međutim, budući da peć nema kontroliranu atmosferu, odlučeno je koristiti se temperaturnim rasponom između 880°C i 900°C kako bi se osiguralo da svi uzorci iz različitih toplinskih obrada dostignu iste uvjete unutar zadanog vremena. Budući da je uzorak izrađen od niskolegirano čelika i ima debljinu od 11 mm, u ovom slučaju, vrijeme je izračunato na 3 min po mm debljine plus 20% vremena [20].

Važno je napomenuti da je za toplinske obrade korištena zaštitna oprema – zaštitni vizir, zaštitna pregača, zaštitne rukavice.

Kod žarenja, prvo smo pripremili uzorak kako je već ranije opisano. Nakon što se peć zagrijala na 900°C, zadržavali smo tu temperaturu određeno vrijeme (vrijeme zadržavanja ovisi o debljini materijala i je li čelik legiran). U našem slučaju čelik je niskolegiran i ima debljinu 11 mm te smo zbog toga uzorak zadržavali na temperaturi od 900°C, 40 minuta. Kada je isteklo vrijeme, ugasili smo peć i ostavili da se uzorak sporo hladi. Kad se uzorak ohladio, morali smo ponovno provesti proces brušenja kako bismo mogli što točnije izmjeriti tvrdoću uzorka nakon procesa žarenja.

Kod procesa normalizacije također smo morali pripremiti uzorak. To smo radili na način da smo peć zagrijali na 880°C te smo zatim ubacili uzorak. Ostavili smo uzorak na toj temperaturi određeno vrijeme odnosno 40 min (zbog vrste i debljine materijala) te ga izvadili na keramičku ploču i ostavili da se hladi na zraku. Zbog velike temperature, mjerenje tvrdoće nije bilo moguće obaviti odmah te smo to ostavili za sljedeći dan. Ovisno o debljini uzorka, ovisi vrijeme čekanja hlađenja (od 10 min do nekoliko sati).

Radili smo dvije vrste kaljenja odnosno kaljenje u ulju i kaljenje u vodi (njihova je temperatura na sobnoj temperaturi oko 20°C). Proces je sličan kao kod i normalizacije, uzorke smo ubacili nakon što je peć postigla temperaturu od 880°C i ostavili da se zadrže na toj temperaturi 40 min. Nakon tog vremena, uz određene mjere opreza, uhvatili smo uzorak kliještima, naglo uronili u vodu te lagano miješali 10 do 15 sekundi. Zatim smo isto napravili s drugim uzorkom koji smo uronili u ulje “w5 SAE 5W40 supertech engine oil” te također miješali 10 – 15 sekundi i postavili na keramičku površinu. Uzorci su se još malo trebali hladiti prije mjerenja tvrdoće. Uzorak koji se uronio u vodu prije je ohlađen nego onaj u ulju zato jer je voda bolje rashladno sredstvo nego ulje.

Zadnji proces toplinske obrade koji smo radili je popuštanje. To je postupak koji smo radili na uzorcima kaljenja, odnosno na uzorcima koje smo hladili vodom i uljem. Popuštanje smo radili na način da smo peć zagrijali na 250°C i zatim ubacili uzroke. Ostavili smo uzorke da stoje u peći na toj temperaturi 90 min te ih izvadili i ostavili da se hlade na zraku.

Peć kojom smo se koristili za toplinske obrade je od proizvođača “OVER industrijska elektronika” i kontrolora XMTG-808 i nalazi se na slikama 13 i 14.



Slika 13. Peć proizvođača “OVER industrijska elektronika” kontrolora “XMTG-808”.



Slika 14. Otvorena peć.

Karakteristike ove peći:

- konstrukcija čelika, oplata aluminij
- grijači od kanthala (FeCrAl legura) nalaze se u utorima stranica i poda
- robusna izvedba, izolacija – keramička opeka u kombinaciji cijevi i keramičke obloge.

Na slici 15 nalazi se unutrašnjost peći s keramičkom izolacijom i grijačima od kanthala.



Slika 15. Unutrašnjost peći s keramičkom izolacijom i grijačima od kanthala.

1.4.3. TVRDOĆA I ČVRSTOĆA ŠIPKE

Nakon toplinskih obrada uzorka, mjerimo tvrdoću uzorka te na taj način otkrivamo kakav je utjecaj imala određena toplinska obrada. Tvrdoću smo mjerili kod 5 uzoraka odnosno 7 puta, jer smo na uzorcima kod kojih smo radili toplinsku obradu kaljenja (voda i ulje) iza radili toplinsku obradu popuštanja te kod nje također mjerili tvrdoću. Zbog lakšeg snalaženja uzorke smo imenovali abecednim redom od A do G.

Tablica 2. Imena uzoraka.

STANJE UZORKA	IZVORNO	ŽARENJE	NORMALIZACIJA	KALJENJE VODOM	KALJENJE ULJEM	POPUŠTANJE VODOM	POPUŠTANJE ULJEM
IME UZORKA	A	B	C	D	E	F	G

Tvrdoću mjerimo po Rockwellu gdje se utiskuje posebni utiskivač kod kojeg mjerimo dubinu otiska, za razliku kod Brinella i Vickersa. Samo kod žarenja koristili smo se HRB metodom, a kod ostali HRC [21].

HRB metoda koristi se za mekše materijale odnosno za one s nižom tvrdoćom i kod nje koristimo se zakaljenom čeličnom kuglicom kao penetratorom. Kod HRB metode moramo paziti da opterećenje bude namješteno na 100 kg (izbornik ispitne sile) [11].

HRC metoda koristi se za tvrde materijale te se kod nje koristimo dijamantnim stošcem kao penetratorom. Opterećenje namještamo na silu koja odgovara težini mase od 150 kg [11],[21]. Na slici 16 prikazani su penetratori za HRB i HRC metodu.



Slika 16. Penetratori za HRC i HRB metodu.

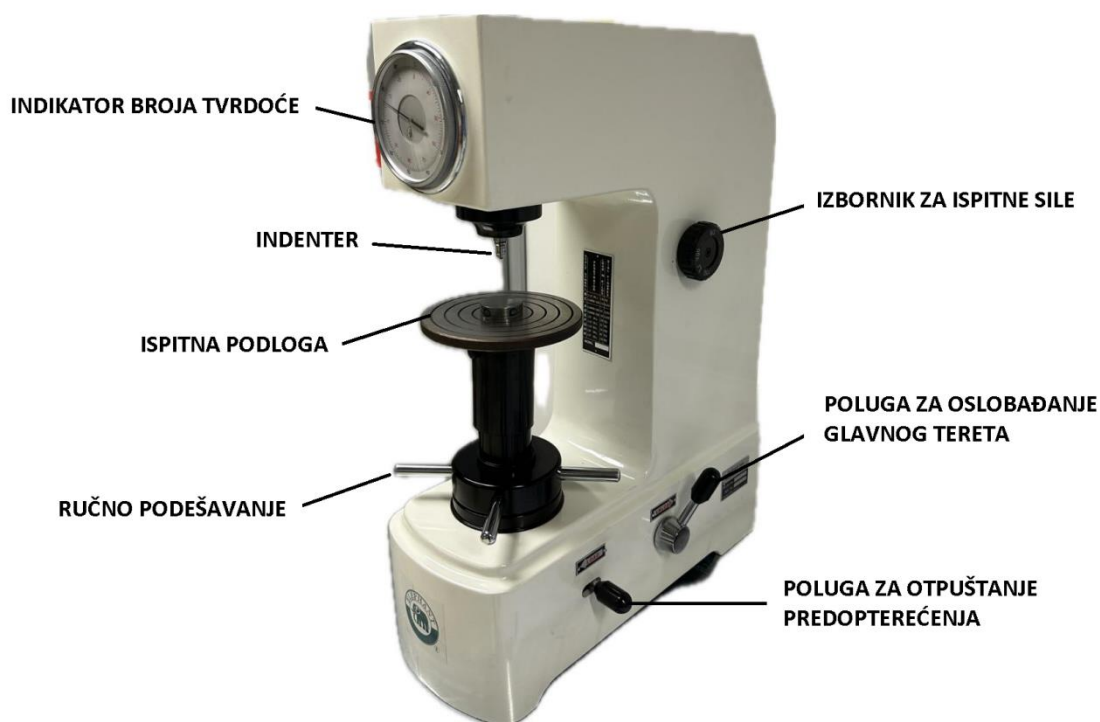
Kod postupka mjerenja tvrdoće, nakon toplinskih obrada, najprije smo još jednom brusili kako ne bi bilo dodatnih čestica i kako bi uklonili oksidirajuće ostatke materijala. Zatim smo kalibrirali uređaj kako bi nam davao što točnije rezultate na način da smo se koristili standardnim blokovima za kalibraciju i prema njima namještali indikator broja tvrdoće po potrebi. Zatim smo uzorak postavili na mjesto ispitne podloge i ručno okretali kotač dok ne bi kazaljka došla na mjesto gdje se nalazi “C” ili “B” na indikatoru broja tvrdoće, kao što je prikazano na slici 17.



Slika 17. Analogni indikator broja tvrdoće HRB (brojevi u crvenoj boji) i HRC (brojevi u plavoj boji).

Kada se na indikatoru kazaljka poklopi s traženim mjestom, povlačimo polugu za oslobađanje glavnog tereta i brojimo do 10. Nakon odbrojavanja povlačimo drugu polugu za otpuštanje opterećenja te očitamo rezultate.

Uređaj za ispitivanje tvrdoće tipa Rockwell, model EHT-CE3RN proizvođača Elephant Manufacturing prikazan je na slici 18.



Slika 18. Uređaj za ispitivanje tvrdoće tipa Rockwell, model EHT-CE3RN proizvođača Elephant Manufacturing.

Nakon što smo izmjerili tvrdoću na svim uzorcima, uvrstili smo rezultate u formulu (Formula 2) da bismo dobili vlačnu čvrstoću uzorka [22].

$$TS = \frac{HB}{0.3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2)$$

Gdje su:

TS = vlačna čvrstoća

HB = tvrdoća Brinell

Tablica pretvorbe DIN 50150 korištena je za pretvorbu tvrdoće po Rockwellu u tvrdoću po Brinellu [23].

REZULTATI I RASPRAVA

1.5. TOPLISNKA OBRADA

Nakon postupka žarenja dobili smo obradak koji se nalazi na slici 19 pod A te nakon dodatnog obrađivanja, odnosno brušenja, dobili smo obradak koji se nalazi na slici B.



Slika 19. Uzorak toplinske obrade žarenja, prije (A) i poslije brušenja (B).

Na uzorku sa slike 18 B, vide se tragovi koji su nastali zbog oksidacije, koje nije bilo moguće otkloniti, ali se pronašlo dovoljno površine kako bi se mogla izmjeriti tvrdoća. Budući da se radi o peći s oksidirajućom atmosferom, očekuje se da će površina uzorka čelika biti podvrgnuta oksidaciji i dekarburizaciji [11],[13]. Osobito je žareni uzorak, nakon što je proveo otprilike 24 sata u pećnici dok se hladio, pretrpio jaku oksidaciju.

Na slici 20 nalaze se uzorci normalizacije, kaljenja vodom i kaljenja uljem. Nakon toplinske obrade normalizacije, obradak je bio crvenkaste boje zbog velikih temperatura. Kod hlađenja u ulju, nakon kaljenja, obradak je bio plavkaste boje te se ljuštio dio površine koji je vidljiv na slici 20. Također je imao miris koji se dogodio zbog dodira ulja s površinom na visokoj temperaturi.



Slika 20. Uzorci toplinske obrade normalizacije, kaljenja vodom i kaljenja uljem.

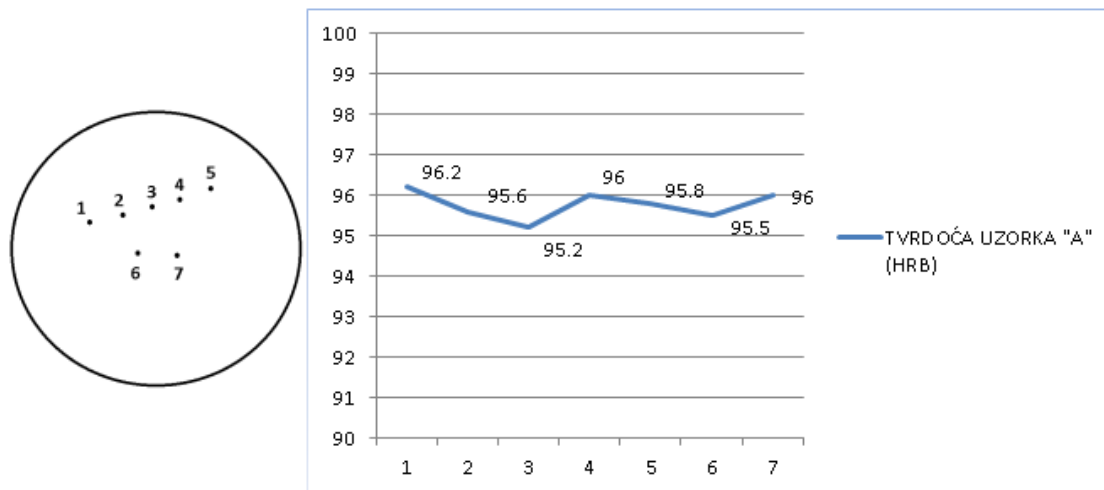
Kod hlađenja u vodi nakon kaljenja, također je bilo ljuštenja površine kao kod hlađenja u ulju, ali u znatno manjim količinama. Nakon brušenja ovog uzorka bila je vidljiva pukotina koja se pojavila na sredini obratka te je ona prikazana na slici 21.



Slika 21. Pukotina na uzorku "Kaljenje vodom".

1.6. TVRDOĆA

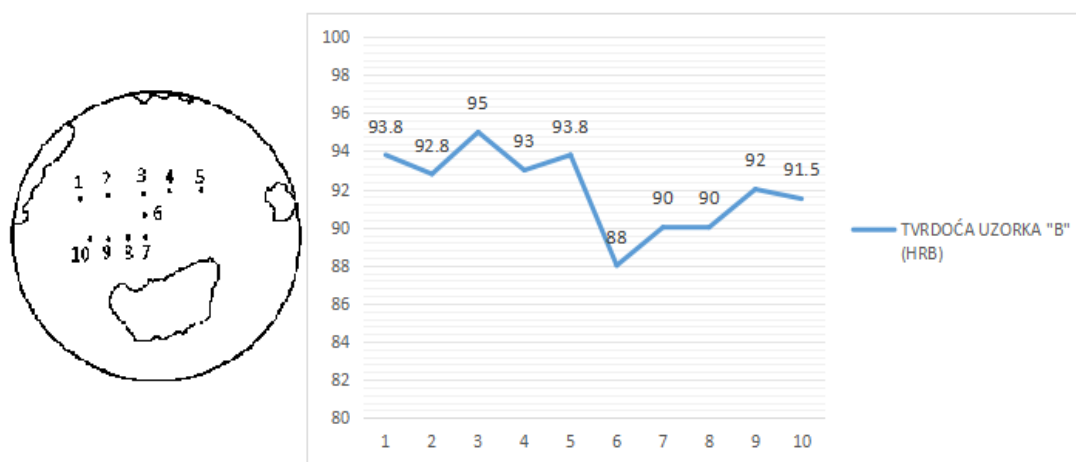
Izmjerena tvrdoća po Rockwellu B prije tokarenja bila je od 94,5 do 96 (HRB), a nakon tokarenja 95 (HRB). Izvorni uzorak imenovali smo u Tablici 2 pod (A). Na slici 22 prikazane su točke u kojima se mjerila tvrdoća i rezultati u dijagramu.



Slika 22. Točke tvrdoće i rezultati uzorka "A".

Uzorak "A" ima raspon tvrdoće od 95,2 do 96,2 (HRB). Za HRB to nije veliko odstupanje jer je samo za 1. Najniža izmjerena tvrdoća je u točki 3 (95,2) koja se dogodila zbog dekarburizacije odnosno gubitka ugljika s površine uzorka.

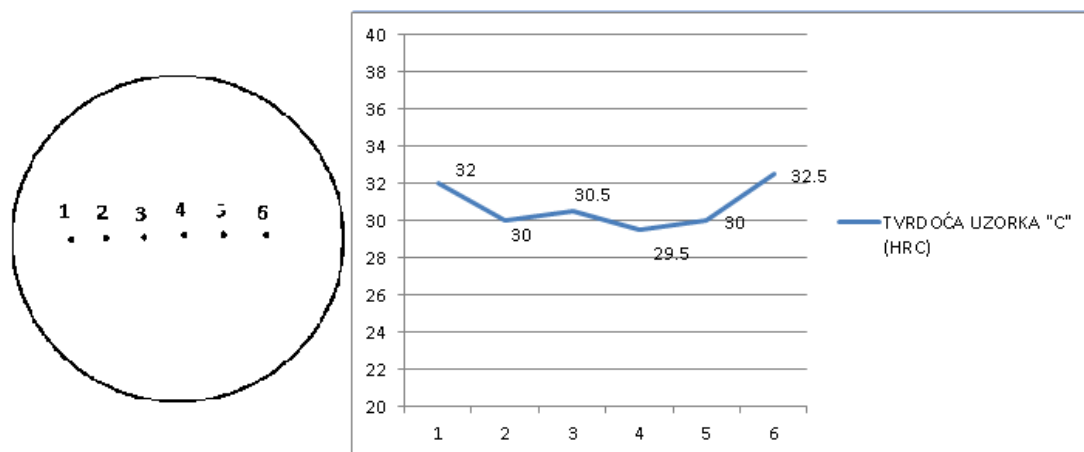
Na slici 23 nalazi se uzorak "B" odnosno onaj koji je nastao nakon toplinske obrade žarenja.



Slika 23. Točke tvrdoće i rezultati uzorka "B".

Kod žarenja za mjerenje tvrdoće koristili smo se također HRB metodom po Rockwellu jer ima nižu tvrdoću. Najniža izmjerena tvrdoća je u točki 6 (88 HRB) koja je nastala zbog dekarburizacije te se ona nalazi točno na sredini obratka.

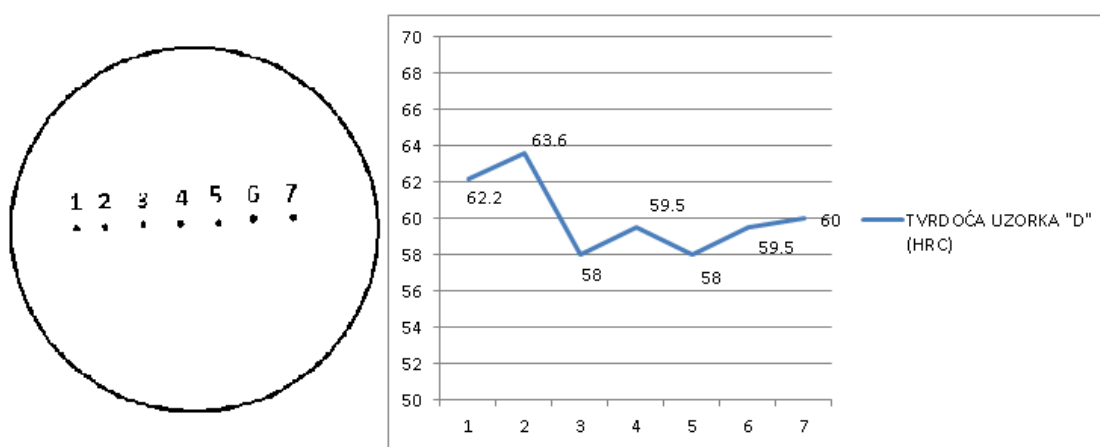
Na slici 24 nalazi se uzorak "C" odnosno onaj koji je nastao nakon toplinske obrade normalizacije.



Slika 24. Točke tvrdoće i rezultati uzorka "C".

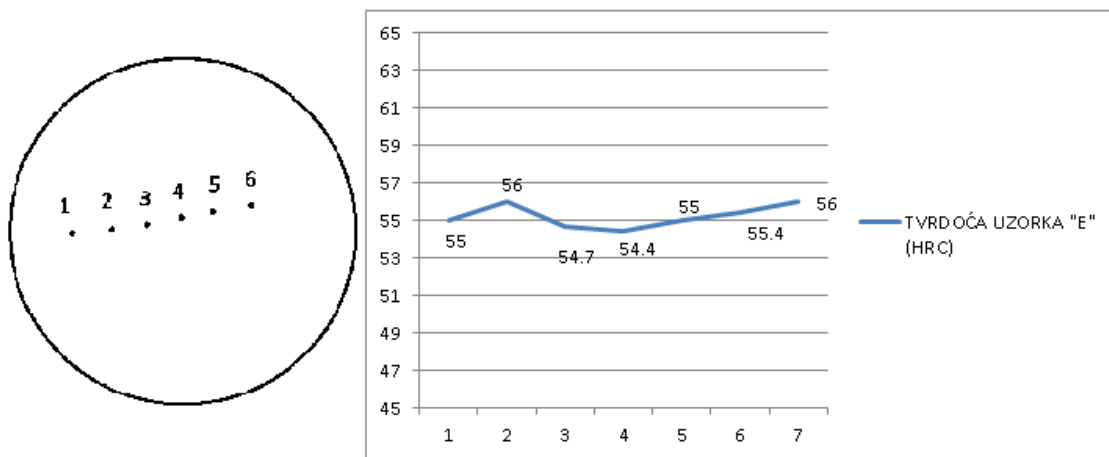
Kod normalizacije, za mjerenje smo se koristili HRC metodom po Rockwellu jer se očekivala veća tvrdoća.

Na slici 25 nalazi se uzorak "D" odnosno onaj koji je nastao nakon toplinske obrade kaljenja vodom.



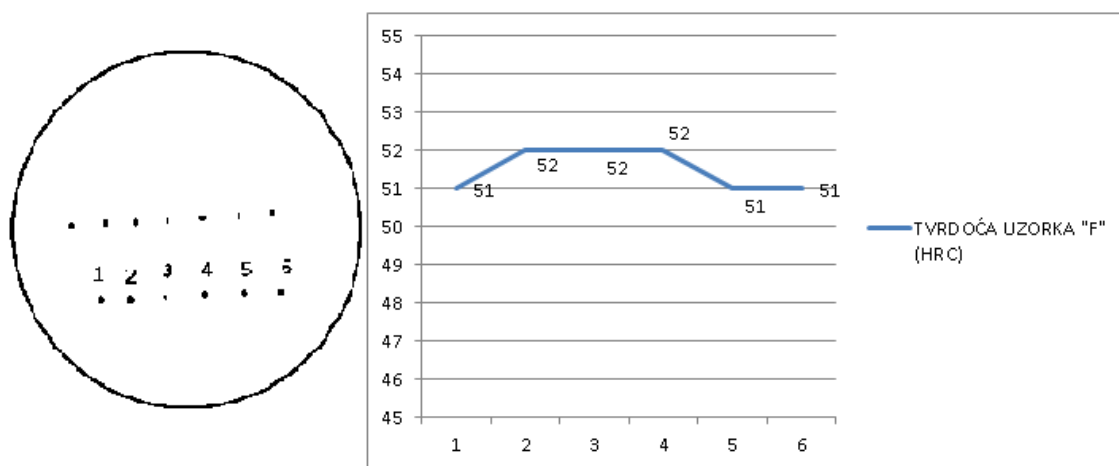
Slika 25. Točke tvrdoće i rezultati uzorka "D".

Na slici 26 nalazi se uzorak "E" odnosno onaj koji je nastao nakon toplinske obrade kaljenja uljem.



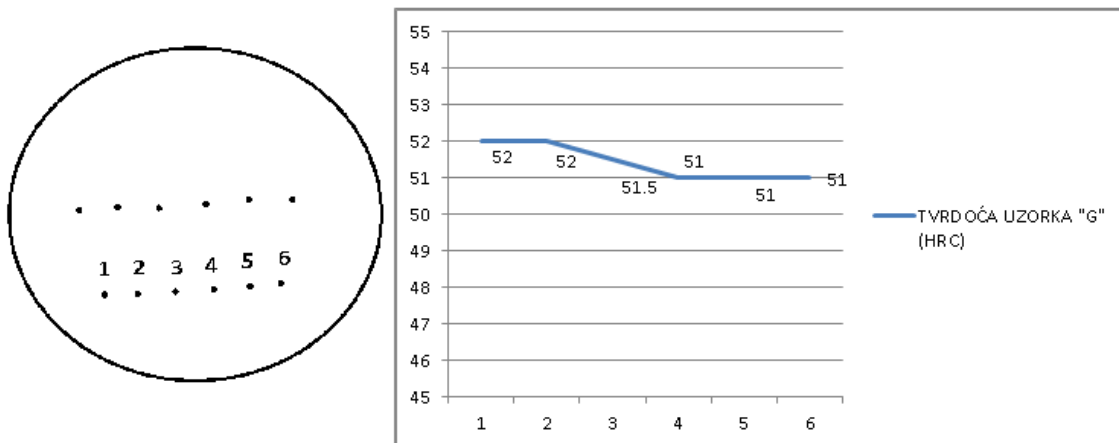
Slika 26. Točke tvrdoće i rezultati uzorka "E".

Na slici 26 nalazi se uzorak "F" odnosno onaj koji je nastao nakon toplinske obrade popuštanja vodom.



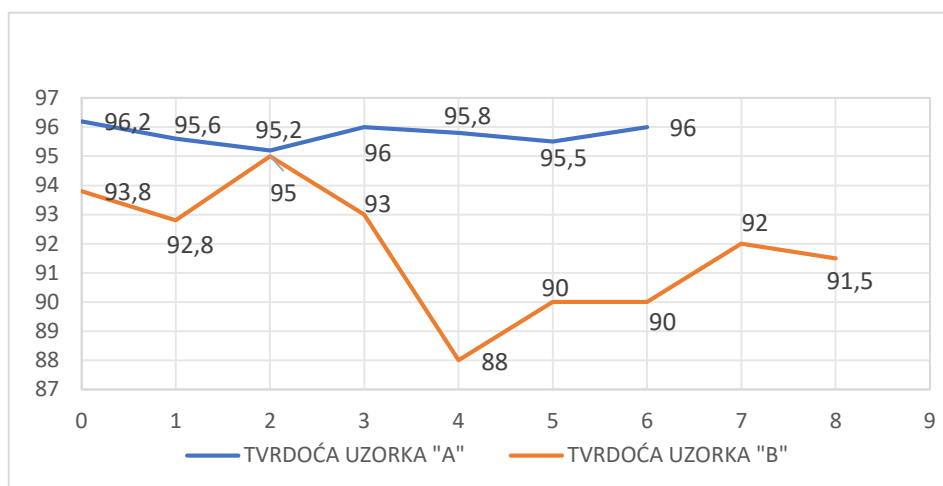
Slika 27. Točke tvrdoće i rezultati uzorka "F".

Na slici 28 nalazi se uzorak "G" odnosno onaj koji je nastao nakon toplinske obrade popuštanja uljem.



Slika 28. Točke tvrdoće i rezultati uzorka "G".

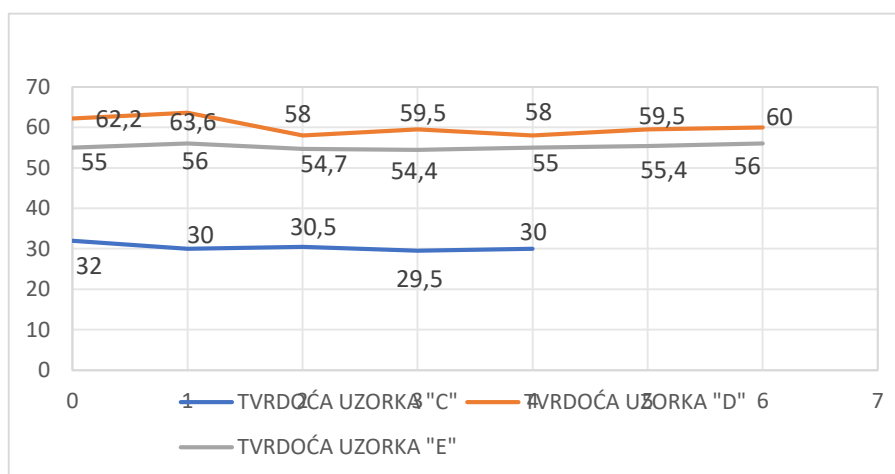
Na slici 29 nalaze se uspoređeni uzorci "A" i "B", odnosno izvornoga uzorka s uzorkom žarenja.



Slika 29. Usporedba uzorka "A" i "B".

Slika 29 pokazuje da izvorni uzorak "A", koji je bio potpuno žaren i hladno obrađen, ima veću tvrdoću od žarenog uzorka "B". Prosječna tvrdoća uzorka "A" približno je 97 HRB, a uzorka "B" je 92 HRB. Prema slici 2, mikrostruktura je α -ferita i perlita. Očekuje se da će izvorni uzorak imati veću tvrdoću jer je bio hladno obrađen "+C" nakon žarenja "+A" [19]. Nadalje, uzorak "B", budući da je žaren u peći s oksidirajućom atmosferom, pretrpio je oksidaciju i površinsku dekarburizaciju [11],[13]. Također treba napomenuti da smo jedino kod ova dva uzorka koristili HRB metodu mjerenja tvrdoće po metodi Rockwell.

Na slici 30 prikazani su uspoređeni uzorci “C”, “D” i “E”. To su uzorci normalizacije i kaljenja (voda i ulje).

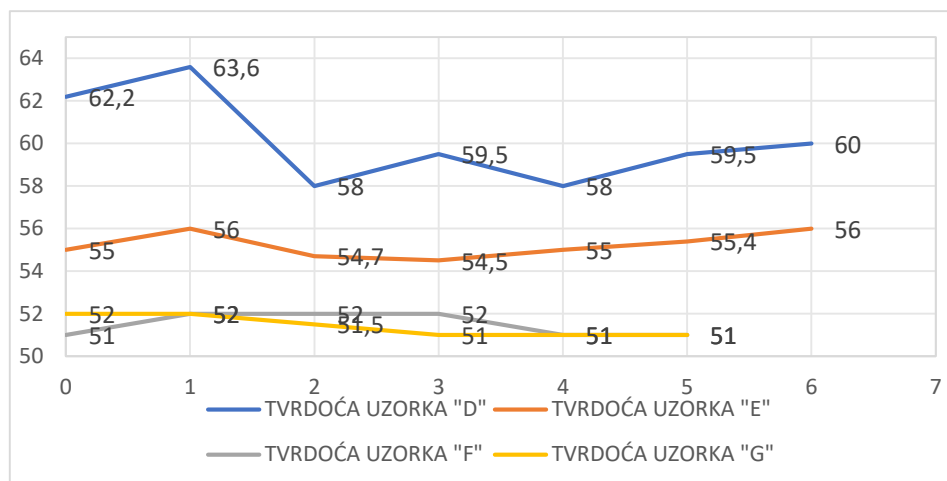


Slika 30. Usporedba uzorka “C”, “D” i “E”.

Na slici 30 vidi se kako je kod normalizacije izmjerena daleko najmanja čvrstoća. Normalizirani uzorak ima prosječnu tvrdoću od 30 HRC (oko 300 HV), a mikrostruktura prikazana na slici 2 pokazuje prisutnost α -ferita, perlita, velike količine bainita i malo martenzita.

Kod kaljenja vodom izmjerena je nešto viša tvrdoća nego kod kaljenja uljem. Kao što se može vidjeti na CCT dijagramu (slika 2), uzorak kaljen u vodi ima prosječnu tvrdoću od 60 HRC (približno 740 HV), a mikrostruktura uzorka predstavlja praktički 95% martenzita s određenom količinom zadržanog austenita. Uzorak kaljen u ulju s prosječnom tvrdoćom od 55 HRC (cca. 610 HV) pokazuje prisutnost bainita i martenzita.

Na slici 31 prikazani su uspoređeni uzorci “D”, “E”, “F” i “G”. To su uzorci kaljenja (voda i ulje) i popuštanja njihovih uzoraka.



Slika 31. Usporedba uzorka "D", "E", "F" i "G".

Na slici se vidi kako kod popuštanja pada tvrdoća, a s njom i čvrstoća. Kod popuštanja vodom i uljem jako su slične tvrdoće pa skoro i identične, tj. na nekim dijelovima i jesu.

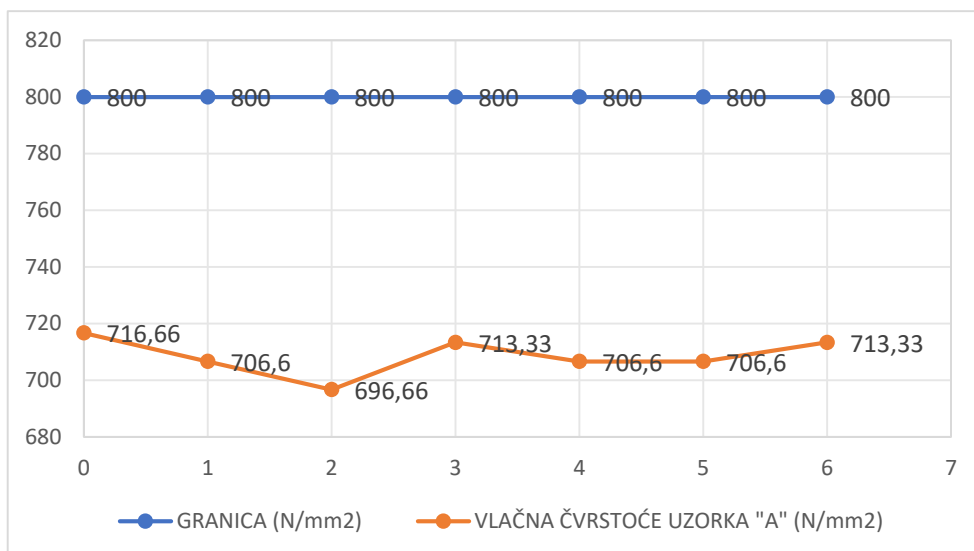
1.7. ČVRSTOĆA U ODNOSU NA TVRDOĆU

Nakon što smo izmjerili tvrdoće naših uzoraka, mogli smo dobiti rezultate vlačne čvrstoće pomoću već ranije zadane formule. Kako je već poznato i ranije spomenuto, granica za legirane čelike je takva da vlačna čvrstoća ne smije prelaziti 800 N/mm^2 [2]. Na taj način mogli smo odrediti koja toplinska obrada odgovara ovom materijalu, a koja ne.

Zbog toga što se kod ovih uzoraka koristila metoda HRC po Rockwellu, može se zaključiti da će nakon izračuna kod ove tri metode, vlačna čvrstoća prelaziti već određenu zadanu granicu te metode normalizacije i kaljenja nisu potrebne kod ovog materijala.

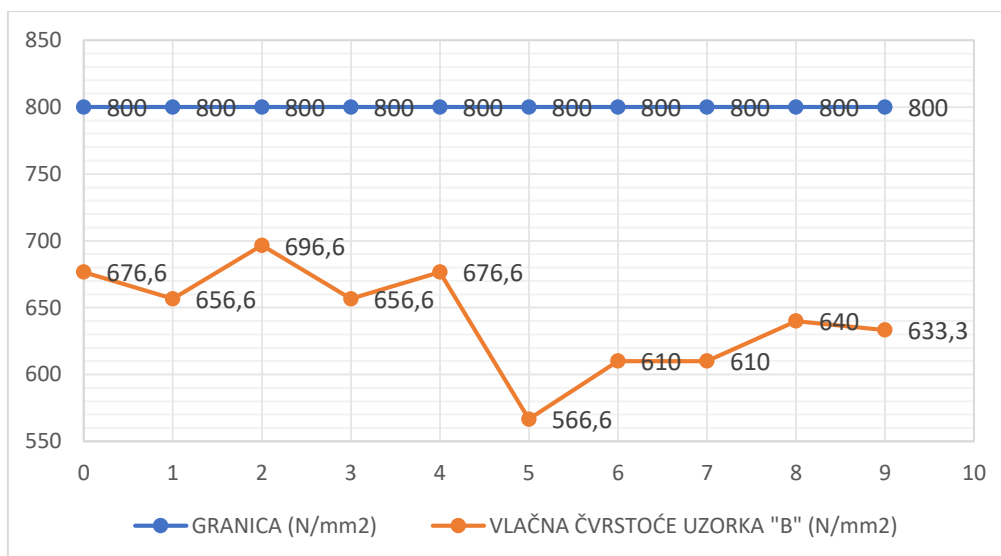
Na slici 32 nalazi se vlačna čvrstoća uzorka "A".

Prema formuli (2) može se uočiti da će izvorni uzorak imati i veću vlačnu čvrstoću.



Slika 32. Vlačna čvrstoća uzorka "A".

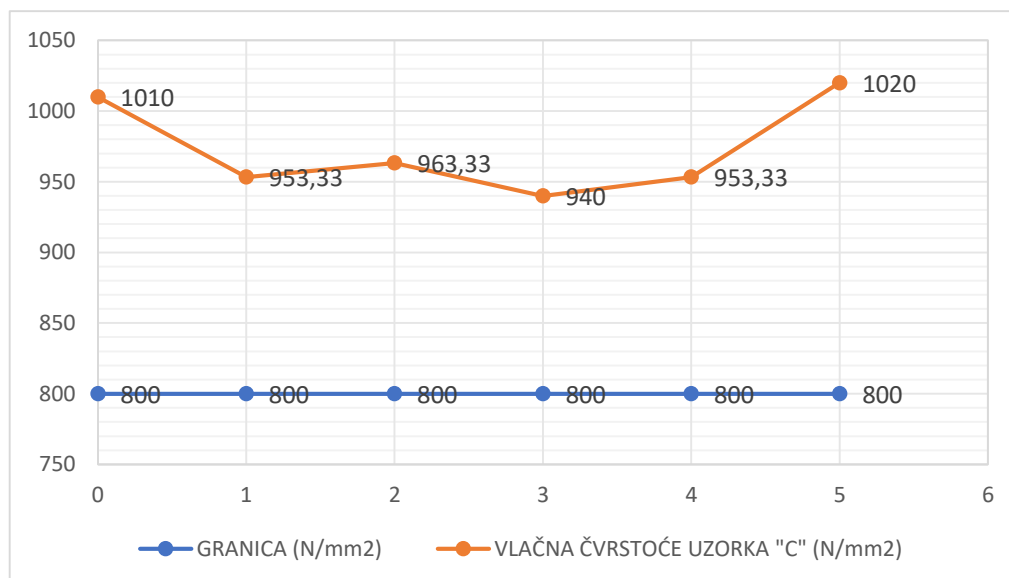
Na slici se vidi kako nakon izmjerenih vlačnih čvrstoća kod uzorka "A" (izvornog uzorka), rezultat ne prelazi zadanu granicu te na taj način zadovoljava normu. Na slici 33 nalazi se vlačna čvrstoća uzorka "B".



Slika 33. Vlačna čvrstoća uzorka "B".

Na slici se vidi kako nakon izmjerenih vlačnih čvrstoća kod uzorka "B" (žarenja), rezultat ne prelazi zadanu granicu te na taj način zadovoljava normu.

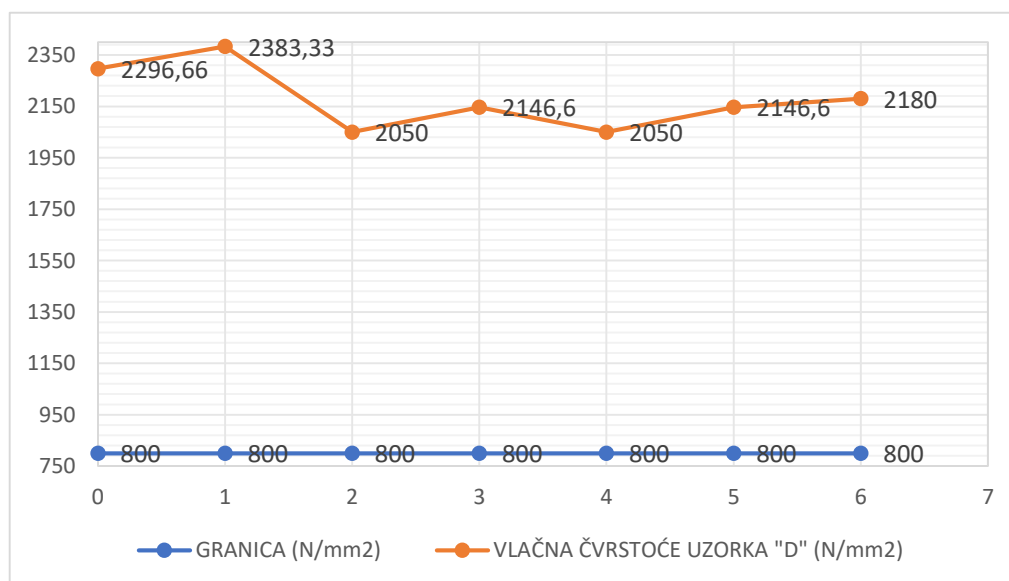
Na slici 34 nalazi se vlačna čvrstoća uzorka "C".



Slika 34. Vlačna čvrstoća uzorka "C".

Na slici se vidi kako nakon izmjerenih vlačnih čvrstoća kod uzorka "C" (normalizacija), rezultat prelazi zadanu granicu te na taj način ne zadovoljava normu.

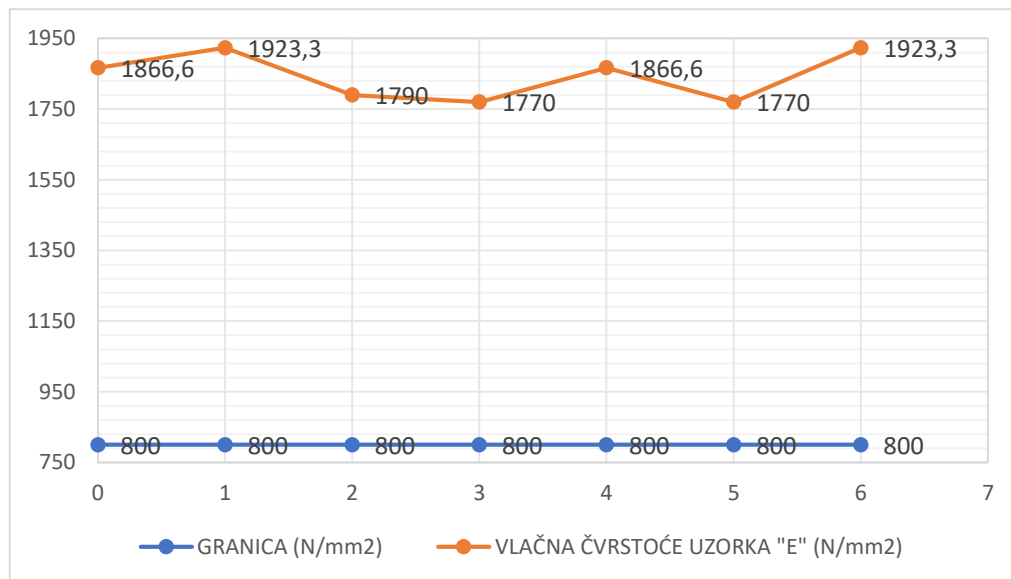
Na slici 35 nalazi se vlačna čvrstoća uzorka "D".



Slika 35. Vlačna čvrstoća uzorka "D".

Na slici se vidi kako nakon izmjerenih vlačnih čvrstoća kod uzorka "D" (kaljenje vodom), rezultat prelazi zadanu granicu te na taj način ne zadovoljava usuglašeni zahtjev IACS UR M68, odnosno tehničkih pravila klasifikacijskog društva.

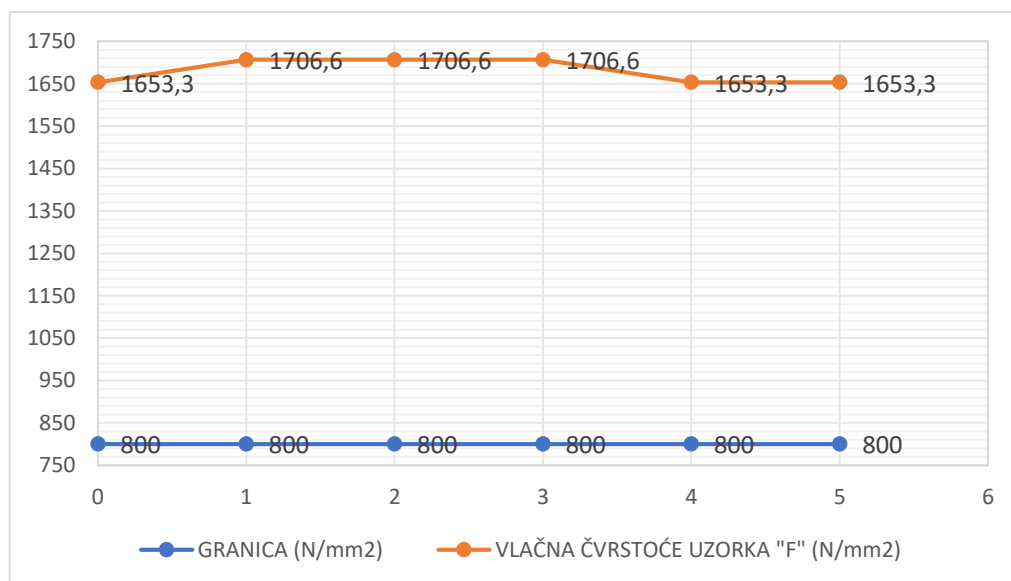
Na slici 36 nalazi se vlačna čvrstoća uzorka "E".



Slika 36. Vlačna čvrstoća uzorka "E".

Na slici se vidi kako nakon izmjerenih vlačnih čvrstoća kod uzorka "E" (kaljenje uljem), rezultat prelazi zadanu granicu te na taj način ne zadovoljava usuglašeni zahtjev IACS UR M68, odnosno tehničkih pravila klasifikacijskog društva..

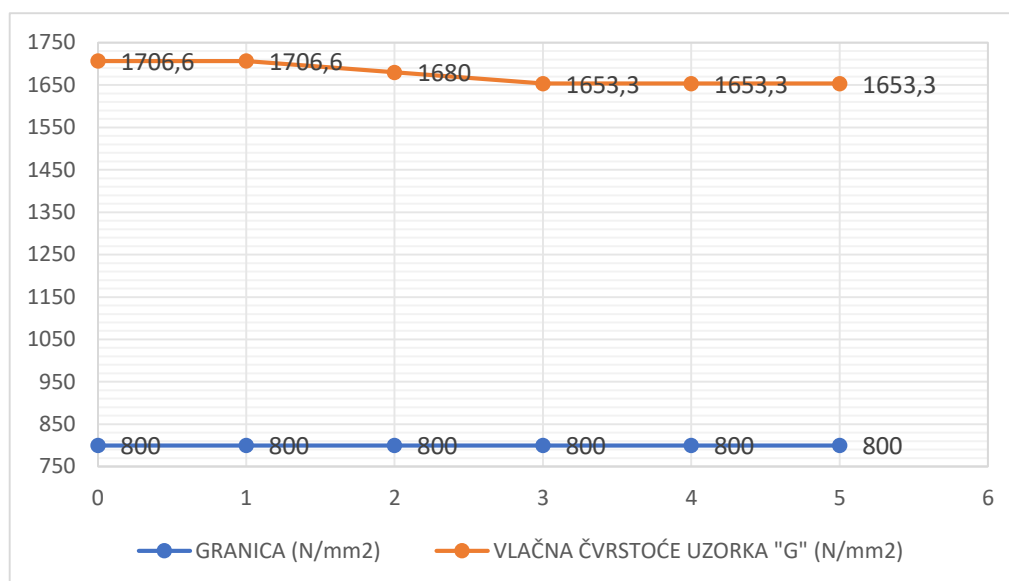
Na slici 37 nalazi se vlačna čvrstoća uzorka "F".



Slika 37. Vlačna čvrstoća uzorka "F".

Na slici se vidi kako nakon izmjerenih vlačnih čvrstoća kod uzorka "F" (popuštanje vodom), rezultat prelazi zadanu granicu te na taj način ne zadovoljava usuglašeni zahtjev IACS UR M68, odnosno tehničkih pravila klasifikacijskog društva..

Na slici 38 nalazi se vlačna čvrstoća uzorka "G".



Slika 38. Vlačna čvrstoća uzorka "G".

Na slici se vidi kako nakon izmjerenih vlačnih čvrstoća kod uzorka "G" (popuštanje uljem), rezultat prelazi zadanu granicu te na taj način ne zadovoljava usuglašeni zahtjev IACS UR M68, odnosno tehničkih pravila klasifikacijskog društva..

ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirane su promjene u tvrdoći i čvrstoći čelika 42CrMo4 koje nastaju kao rezultat različitih postupaka toplinske obrade. Stoga, cilj eksperimenta bio je određivanje utjecaja toplinske obrade na zadani čelik. Usporedbom mehaničkih svojstava čelika u izvornom stanju te nakon žarenja, normalizacije, kaljenja i popuštanja, dobiveni su podatci koji jasno ukazuju na značajan utjecaj toplinske obrade na strukturu i svojstva materijala. Rezultati ispitivanja pokazuju da postupci toplinske obrade značajno povećavaju tvrdoću i čvrstoću čelika.

Nakon svih toplinskih obrada, vlačna čvrstoća zadovoljava uvjete već kod izvornog uzorka i onog kod kojeg smo radili toplinsku obradu žarenja. Točnije, povezivanjem izmjerene tvrdoće čelika s vlačnom čvrstoćom izračunatom prema formuli 2, može se zaključiti da će vlačna čvrstoća normaliziranog uzorka kaljenog u vodi i ulju premašiti unaprijed određenu granicu od 800 N/mm^2 . Stoga slijedi da posebna toplinska obrada otvrdnjavanja čelika EN 42CrMo4 nije potrebna da bi se koristio kao vratilo ili međuvratilo, to jest, može se koristiti u izvornom stanju.

Zaključno, rad pruža temeljne spoznaje o utjecaju toplinske obrade na čelik 42CrMo4, naglašavajući važnost prilagodbe postupaka obrade specifičnim zahtjevima brodskih dijelova. Dobiveni rezultati mogu poslužiti kao smjernica za daljnje istraživanje i unapređenje postupaka obrade čelika u brodograđevnoj strojogradnji s ciljem postizanja još boljih mehaničkih svojstava i dugovječnosti brodskih konstrukcija.

LITERATURA

- [1] Ozretić, V., Brodski pomoćni strojevi i uređaji, 1980.
- [2] IACS Unified Requirement UR M68. Dimensions of propulsion shafts and their permissible torsional vibration stresses, International Association of Classification Societies - IACS Req. 2005/Rev. 3 2021., 1-9.
- [3] Croatian Register of Shipping (2020.). Rules for the Classification of Ships, Part 7 - Machinery Installation. Split: General Committee to the Croatian Register of Shipping.
- [4] DIN 743-3 2012-12. Calculation of load capacity of shafts and axles – Part 3: Strength of materials, 2012.
- [5] IACS Classification Surveys. Hull and machinery steel forgings. International Association of Classification Societies – IACS UR W7 Rev4 CLN. URL: ur-w7rev4, (pristupljeno 1. srpnja 2024.)
- [6] Hrvatski registar brodova (CRS) Rules for the classification of ships, Part 25.-Metallic materials, 2015.
- [7] H. Chandler, Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, 2nd, Ed. ASM International, 1995.
- [8] Liščić, B., Čelični materijali – 2, Metalbiro, Zagreb, 1981.
- [9] CCT and TTT Diagrams of Steels, URL: <https://steeldata.info/std/demo/data/8168.html>, (pristupljeno 22. srpnja 2024.)
- [10] Paleka M., Upravljanje procesima toplinske obrade metala, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [11] Gabrić I., Šitić S., Materijali II, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [12] Callister Jr. W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Ed. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2018.
- [13] Decarburization. In: Thermochemical Surface Engineering of Steels - Improving Materials Performance. Editors: Eric J. Mittemeijer and Marcel A. J. Somers, 2015, p. 531-532.
- [14] Wikipedija, Žarenje, URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%BDarenje>, (pristupljeno 29. lipnja 2024.)
- [15] Žarenje naspram normaliziranja: Koja je razlika? URL: <https://proinstal.hr/zarenje-naspram-normaliziranja-koja-je-razlika/>, (pristupljeno 17. srpnja 2024.)

- [16] Wikipedija, Kaljenje. URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kaljenje>, (pristupljeno 19. srpnja 2024.)
- [17] Wikipedija, Popuštanje. URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Popu%C5%A1tanje>, (pristupljeno 1. kolovoza 2024.)
- [18] Toplinska obrada čelika, prezentacija s predavanja, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Hrvatska
- [19] SteelNumber. European Steel and Alloys/Grades Numbers. URL: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=335, (pristupljeno 10. lipnja 2024.)
- [20] J. D. Verhoeven, Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist, ASM international, 2007.
- [21] Rockwell Hardness Testing. URL: <https://www.wermac.org/materials/rockwell.html>, (pristupljeno 29. lipnja 2024.)
- [22] Hardness testing. IN: NDE Handbook, Non-destructive examination methods for condition monitoring, 1989, p. 103-119.
- [23] DIN 50150, Conversion Of Hardness Values for Metallic Materials, 2000.

POPIS SLIKA

Slika 1. Vratilni vod i njegovi dijelovi [1].	2
Slika 2. Dijagram kontinuiranog hlađenja čelika EN 42CrMo4. [9]	5
Slika 3. Shematski prikaz ciklusa toplinske obrade [10].	6
Slika 4. Shema faznog dijagrama željezo-željezni karbid koja pokazuje raspon temperature toplinske obrade čelika [11].	7
Slika 5. Nastajanje oksidnih slojeva na površini čelika [11].	8
Slika 6. Dijagram toplinske obrade žarenja [11].	9
Slika 7. Postupak toplinske obrade normalizacije [11].	11
Slika 8. Postupak toplinske obrade kaljenja [11].	11
Slika 9. Izbor pravilne temperature kaljenja [11].	13
Slika 10. Dijagram popuštanja različitih čelika [11].	14
Slika 11. Primjeri toplinske obrade čelika kaljenjem i popuštanjem[18].	15
Slika 12. Uzorak šipke debljine 11mm i promjera 40mm.	17
Slika 13. Peć proizvođača “OVER industrijska elektronika” kontrolora “XMTG-808”.	19
Slika 14. Otvorena peć.	19
Slika 15. Unutrašnjost peći s keramičkom izolacijom i grijačima od kanthala.	20
Slika 16. Penetratori za HRC i HRB metodu.	21
Slika 17. Analogni indikator broja tvrdoće HRB (brojevi u crvenoj boji) i HRC (brojevi u plavoj boji).	21
Slika 18. Uređaj za ispitivanje tvrdoće tipa Rockwell, model EHT-CE3RN proizvođača Elephant Manufacturing.	22
Slika 19. Uzorak toplinske obrade žarenja, prije (A) i poslije brušenja (B).	23
Slika 20. Uzorci toplinske obrade normalizacije, kaljenja vodom i kaljenja uljem.	24
Slika 21. Pukotina na uzorku “Kaljnje vodom”.	24
Slika 22. Točke tvrdoće i rezultati uzorka “A”.	25
Slika 23. Točke tvrdoće i rezultati uzorka “B”.	25
Slika 24. Točke tvrdoće i rezultati uzorka “C”.	26
Slika 25. Točke tvrdoće i rezultati uzorka “D”.	26
Slika 26. Točke tvrdoće i rezultati uzorka “E”.	27
Slika 27. Točke tvrdoće i rezultati uzorka “F”.	27
Slika 28. Točke tvedoće i rezultati uzorka “G”.	28

Slika 29. Usporedba uzorka "A" i "B".....	28
Slika 30. Usporedba uzorka "C", "D" i "E".....	29
Slika 31. Usporedba uzorka "D", "E", "F" i "G".....	30
Slika 32. Vlačna čvrstoća uzorka "A".....	31
Slika 33. Vlačna čvrstoća uzorka "B".....	31
Slika 34. Vlačna čvrstoća uzorka "C".....	32
Slika 35. Vlačna čvrstoća uzorka "D".....	32
Slika 36. Vlačna čvrstoća uzorka "E".....	33
Slika 37. Vlačna čvrstoća uzorka "F".....	33
Slika 38. Vlačna čvrstoća uzorka "G".....	34

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav čelika 42CrMo4/Č.4732 (Prilog 1).	16
Tablica 2. Imena uzoraka.....	20

POPIS KRATICA

BCT (engl. Body-Centered Tetragonal)	prostorno centrirana tetragonska rešetka
CCT (engl. <i>Continuous Cooling Transformation</i>)	kontinuirane temperaturne transformacije
HB (engl. <i>Brinell hardness</i>)	tvrdća po metodi Brinell
HRC (engl. <i>Rockwell hardness C scale</i>)	C skala Rockwellove tvrdoće
HRB (engl. <i>Rockwell hardness B scale</i>)	B skala Rockwellove tvrdoće
HV (engl. <i>Vickers hardness</i>)	tvrdća po metodi Vickers
TTT (engl. <i>Time Temperature Transformation</i>)	vremensko-temperaturne transformacije

PRILOG 1

Potvrda o inspekciji za čelik 42CrMo4+A+C koju je osigurao Třinecké Železářny – Moravia Steel.



A02 Druh dokumentu / Type of inspection document Inspekční certifikát 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004										
A01/A06 Výrobní závod / Manufacturer TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech republic VF - Tažárna ocelí, Tovární 1688, 686 02 Staré Město, Czech republic			Stránka / Page 1/1							
A03 Číslo dokumentu / Document No. 2023/10/011177-STO										
A07 Číslo objednávky / Purchaser's order No. 23/004884		A06 Příjemce / Consignee STROJOPROMET D.O.O.								
A10 Číslo kontraktu / Contract No. 0041723731		Huzjanova 40								
A08 Číslo zakázky / Manufacturer's order No. 9920204295/000010		10090 Zagreb Croatia								
B01, B09-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Product description / Dimensions / Tolerance		B02, B04 Označení oceli / Stav dodaný Steel designation / Deliv. state	B03 Materiálová norma Classification standard	B03 Rozměrová norma Dimensional standard						
Tyč lesklá kruhová (h10) Bright round steel bar (h10) 40 mm 3,000 m +100 -0		42CRMO4+A+C	EN 10277:2018	EN 10278						
A11 Dopr. prostředek č. Wagon No.	A13 / A12 Avízo / Ložný list č. Delivery note / Loading list No.	B07 Tavba Heat No.	B08 Kruhy / Kusy Coils / Pieces	B09 Svazky Crbd						
ZG3838HR	ZG0020RH 23/10/006965 5923004177	T32871	0	2						
B07, B14, C70 Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Heat No. / Year of production		C71-C82 Chemické složení-Chemical composition [%]								
Steelmaking process T32871/2023 BO-ZPO2 BOF-cc billets		C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	N	Mo
		0.43	0.78	0.26	0.011	0.030	0.03	1.14	0.0083	0.186
Mechanické hodnoty-Mechanical values										
B07 Tavba Heat No.	B08 Stav zkoušení Test state	C11 Mez kluzu Yield point Rp0.2 (MPa)	C12 Mez pevnosti Tensile strength Rm (MPa)	C13 Tažnost Elongation A5 (%)	C14 Kontrakce Contraction Z (%)	B09 Stav zkoušení Test state	C03 Zkušební teplota Test temperature	C40, C42 Zkouška rázem v ohybu Energy of impact KV [J] / KCV [J/cm ²]		
T32871	+A+C	672	720	15				ano/yes		
B07 Tavba Heat No.	D56 Pěchovací zkoušky Heading tests (EN 10263-1)	D57 Oduhličení Decarburization (max. / mm)	E4 Mikročistota Micropurity (DIN 50602)		C30 Tvrdost HB Hardness HB	C93 Vakuování Vacuum degassing				
T32871						ano/yes				
B07 Tavba Heat No.	D53 Kontrola totožnosti Sparking test	D54 Povrchové vady Surface defects								
T32871	provedena/O.K.	EN 10277 /2								
D01 Kontrola povrchu, tvaru a rozměru odpovídá objednávce. Control of surface, shape and dimension corresponds to the order.										
D05 Dodržena radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg. Radio - isotopic activity was controlled in ladle sample, it was no higher than 100 Bq/kg.						A04 Značka výrobce / Manufacturer's logo 				
Z01 Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky. Products conform with the prescription of order.										
Z03 Elektronická verze tohoto dokumentu je chráněna elektronickým podpisem v souladu s nařízením EU č. 910/2014. Electronical version of this document is protected by the electronical signature according to Regulation (EU) No. 910/2014.										
Z02 Potvrdil - Expert : Stonáček Karel, Staré Město: 01.11.2023						referent T.Jut, nezávislý oprávněný zástupce Officer of Quality Inspection of Realising and Attesting, independent authorized agent				