

Utjecaj toplinske obrade čelika na njegovu obradivost rezanjem

Kukec, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:756046>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Kukec

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Student:

Nikola Kukec

Zagreb, 2022.

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

Koristim ovu priliku da se zahvalim svom mentoru prof. dr. sc. Božidaru Matijeвиću te asistentu Filipu Žanetiću, mag. ing. mech. koji su svojom stručnošću, savjetima i vještinama uvelike pridonijeli kvaliteti ovog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na podršci tijekom studija. Posebno se zahvaljujem svojoj majci Katici, ocu Boži i sestri Božici na razumijevanju, strpljenu i ljubavi.

Nikola Kukec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Kukec** JMBAG: **0035211864**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj toplinske obrade čelika na njegovu obradivost rezanjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of heat treatment of steels on its machinability properties**

Opis zadatka:

Prilikom strojne obrade odvajanjem čestica (tokarenjem, glodanjem, bušenjem) značajan utjecaj na obradivost ima mikrostruktura i mehanička svojstva čelika. Obradivost materijala karakterizira vijek trajanja alata, morfologija tj. izgled strugotine, sila rezanja, kvaliteta površine i temperature sučelja alat/strugotina. Kako različitim postupcima toplinske obrade možemo postići različitu mikrostrukturu, a samim time i različita mehanička svojstva čelika, u ovom završnom radu potrebno je odrediti optimalne tehnološke parametre toplinske obrade kojima se postiže najbolja obradivost niskougličnog čelika. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ŽARENJE..... | 3 |
| 2.1. Sferoidizacijsko žarenje | 6 |
| 3. OBRADIVOST | 7 |
| 3.1. Sile rezanja | 7 |
| 3.1.1. Utjecajni faktori na sile rezanja..... | 8 |
| 3.1.2. Određivanje sile rezanja | 10 |
| 3.1.2.1. Kienzleov model određivanja sila | 10 |
| 3.1.2.2. Merchant – ortogonalno rezanje..... | 11 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 13 |
| 4.1. Žarenje uzorka..... | 13 |
| 4.2. Ispitivanje sila rezanja | 15 |
| 4.2.1. Tokarski stroj..... | 15 |
| 4.2.2. Uređaj za ispitivanje snage..... | 16 |
| 4.2.3. Rezultati ispitivanja..... | 17 |
| 4.3. Analiza mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće | 19 |
| 4.3.1 Priprema uzoraka za očitavanje mikrostrukture..... | 20 |
| 4.3.2 Analiza mikrostrukture uzoraka | 23 |
| 4.3.3 Ispitivanje tvrdoće | 27 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 29 |
| LITERATURA..... | 30 |
| PRILOZI..... | 31 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Primjer toplinske obrade | 1 |
| Slika 2. Općeniti dijagram toplinske obrade | 3 |
| Slika 3. Dijagram temperatura ugrijavanja za postupke žarenja | 4 |
| Slika 4. Dijagram kontinuirane temperaturne transformacije za čelik..... | 5 |
| Slika 5. Mikrostruktura 50CrMoV4 prije i poslije sferoidizacijskog žarenja | 6 |
| Slika 6. Shematski prikaz faktora koji utječu na obradivost | 7 |
| Slika 7. Sile kod tokarenja..... | 8 |
| Slika 8. Ovisnost sila rezanja o dubini rezanja i posmaku | 9 |
| Slika 9. Ovisnost sila rezanja o glavnoj brzini | 9 |
| Slika 10. Merchantov model sila rezanja | 12 |
| Slika 11. Komorna peć | 13 |
| Slika 12. Uzorak u komornoj peći zagrijan na temperaturu za žarenje..... | 14 |
| Slika 13. Žareni uzorak nakon ohlađivanja | 14 |
| Slika 14. Žareni uzorak (lijevo) i nežareni uzorak (desno) | 15 |
| Slika 15. Tokarilica TES-3/2000..... | 16 |
| Slika 16. Uređaj HIOKI 3286 za ispitivanje snage stroja | 17 |
| Slika 17. Pila Mecatome T260 | 20 |
| Slika 18. Izrezani uzorci u polimernoj masi..... | 21 |
| Slika 19. Uređaj za brušenje Mecatech 250 | 22 |
| Slika 20. Svjetlosni mikroskop..... | 23 |
| Slika 21. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 50x..... | 24 |
| Slika 22. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 100x..... | 24 |
| Slika 23. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 200x..... | 24 |
| Slika 24. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 500x..... | 25 |
| Slika 25. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 50x | 25 |
| Slika 26. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 100x | 25 |
| Slika 27. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 200x | 26 |
| Slika 28. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 500x | 26 |
| Slika 29. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 1000x | 26 |
| Slika 30. Vickers tvrdomjer Wolpert Wilson Tukon 2100B..... | 27 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Relativna snaga potrebna za obradu pojedinih materijala..... | 10 |
| Tablica 2. Parametri prve obrade | 17 |
| Tablica 3. Parametri druge obrade | 18 |
| Tablica 4. Parametri treće obrade..... | 18 |
| Tablica 5. Parametri četvrte obrade..... | 19 |
| Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće..... | 28 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------|-----------------|--|
| A_{c1} | °C | Temperatura ugrijavanja |
| a_p | mm | Dubina rezanja |
| b | mm | Širina strugotine |
| d | mm | Dubina rezanja |
| f | mm/okr | Posmak |
| F_1, F_2, F_3 | N | Sila rezanja |
| k_s | MPa | Specifična sila rezanja |
| P_{ph} | kW | Početna snaga stroja |
| P_B | kW | Radna snaga stroja |
| s | mm/okr | Posmak |
| v_{hl} | K/h | Brzina ohlađivanja |
| x, y, z | - | Parametri koji definiraju promjenu specifične sile rezanja u zavisnosti od promjene strugotine |
| Φ | mm | Promjer obratka |

SAŽETAK

Ideja ovog završnog rada bila je istražiti kako toplinska obrada, točnije žarenje utječe na obradivost čelika C60. U radu su detaljno objašnjeni različiti postupci žarenja, posebno sferoidizacijsko žarenje koje se najviše koristi za čelike C60. Nadalje, detaljno je objašnjena obradivost čelika s naglaskom na sile rezanja. Prikazano je kako se sile rezanja mogu analitički izračunati. U sklopu ovog rada napravljen je i eksperiment u kojem je vidljivo kako se te sile mogu eksperimentalno mjeriti. Međutim, veći je naglasak stavljen na dobivanje uvida u razlike u obradivosti niskougličnog čelika C60, nakon što su uzorci prethodno podvrgnuti različitim toplinskim obradama. Cilj ovog rada je karakterizirati utjecaj provedenih postupaka te donijeti zaključke o njihovim utjecajima u strojnoj obradi.

Ključne riječi: žarenje, obradivost čelika, čelik C60

SUMMARY

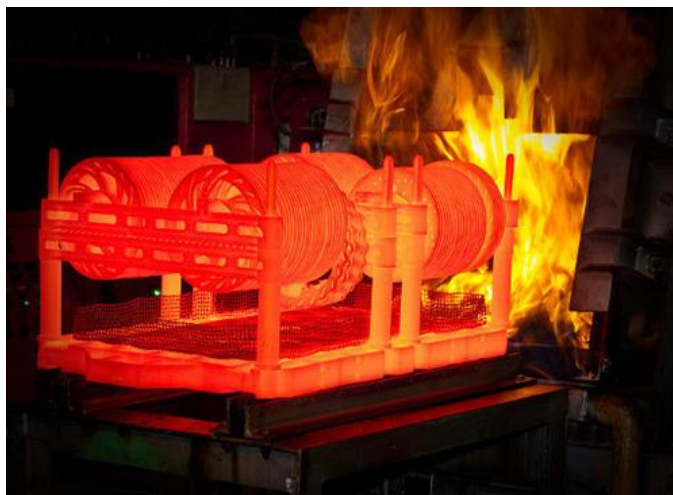
The idea of this final paper was to investigate how heat treatment, more precisely annealing, affects the workability of steel C60. The paper explains in detail various annealing processes, especially spheroidization annealing, which is mostly used for steels C60. Furthermore, the machinability of steel with an emphasis on cutting forces is explained in detail. It is shown how the cutting forces can be calculated analytically. As part of this work, an experiment was made in which it is evident how these forces can be measured experimentally. However, more emphasis has been placed on gaining insight into differences in the machinability of C60 low carbon steel, after the samples have been previously subjected to various heat treatments. The aim of this paper is to characterize the impact of the performed procedures and to draw conclusions about their impacts in machining.

Key words: annealing, machinability of steel, steel C60

1. UVOD

Obrada čelika jedna je od najzastupljenijih i najstarijih djelatnosti u gospodarstvu. Poznato je da je čelik bio u upotrebi već u antičko doba. Najstariji otkriveni čelični predmet pronađen je u Anatoliji, starost mu je procijenjena na 4.000 godina, a podatak da je svjetska proizvodnja čelika 2011. godine iznosila oko 1490 milijuna tona dovoljno govori o tome koliko je čelik bitan materijal. [1]

Zbog njegove relativno velike tvrdoće i čvrstoće, potrebni su veliki napori da bi se čelik obradio na željeni način. U tome vrlo bitan utjecaj ima toplinska obrada koja omogućava da se određena svojstva promjene u određenoj mjeri. Primjer toplinske obrade može se vidjeti na slici 1. Opća definicija postupaka toplinske obrade kaže da se toplinska obrada sastoji od niza ugrijavanja i ohlađivanja sa svrhom promjene strukture, a time i svojstava. Najčešći razlozi za toplinsku obradu čelika su očvršćivanje (povećanje mehaničkih svojstava, posebno vlačne čvrstoće), povećanje žilavosti, povećanje duktilnosti i mogućnosti preoblikovanja, smanjenje unutrašnjih naprezanja, priprema za obradu rezanjem. [2]



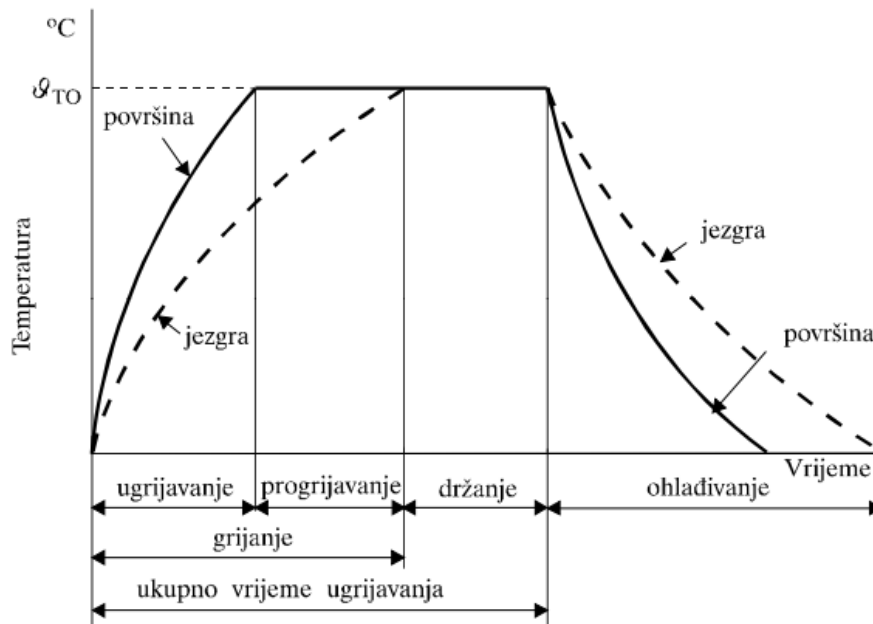
Slika 1. Primjer toplinske obrade

No, treba naglasiti da se ne mogu sve vrste čelika toplinski obrađivati na isti način te ne možemo za sve vrste čelika dobiti ista svojstva. Stoga je potrebno poznavati mikrostrukturu materijala da bismo mogli odabrati najbolje parametre toplinske obrade, te time dobiti najbolja moguća svojstva materijala.

Postupkom žarenja se ukratko smanjuje tvrdoća materijala te se ujednačuje mikrostruktura materijala. Pošto čelik C60 već sam po sebi ima relativno malu tvrdoću, pitanje je da li i na njega žarenje djeluje pozitivno u okviru njegove obradivosti.

2. ŽARENJE

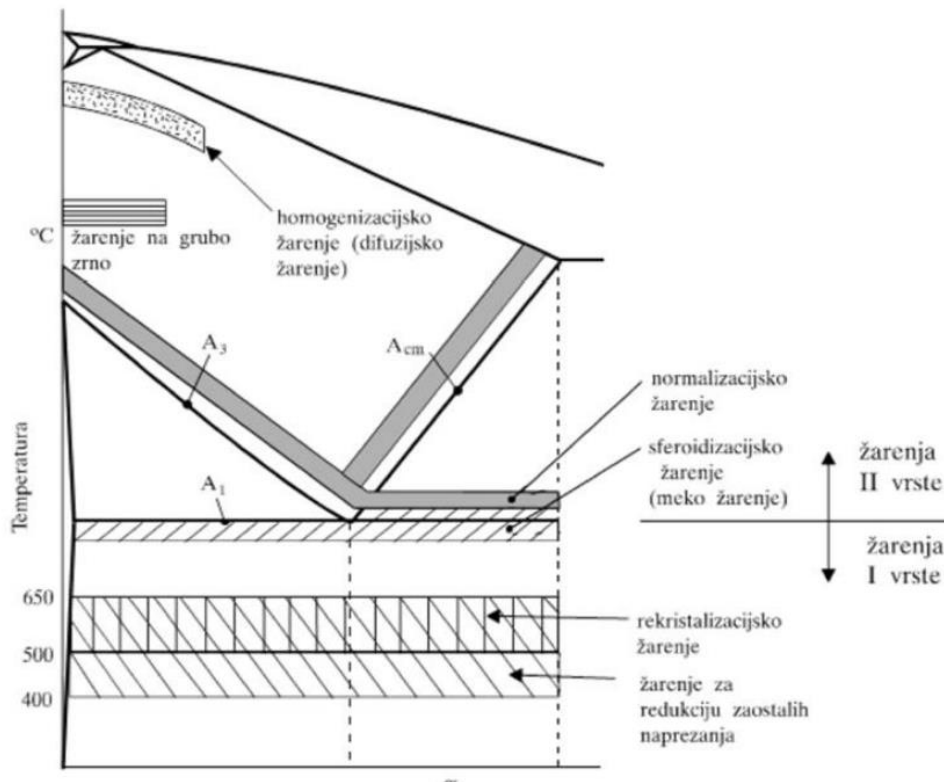
Sve postupke toplinske obrade koji se sastoje od sporog ugrijavanja obratka na odgovarajuću temperaturu, dugog držanja na toj temperaturi te naknadnog sporog hlađenja nazivamo žarenjem. [3] Na slici 2 prikazan je općeniti dijagram postupka toplinske obrade.



Slika 2. Općeniti dijagram toplinske obrade [3]

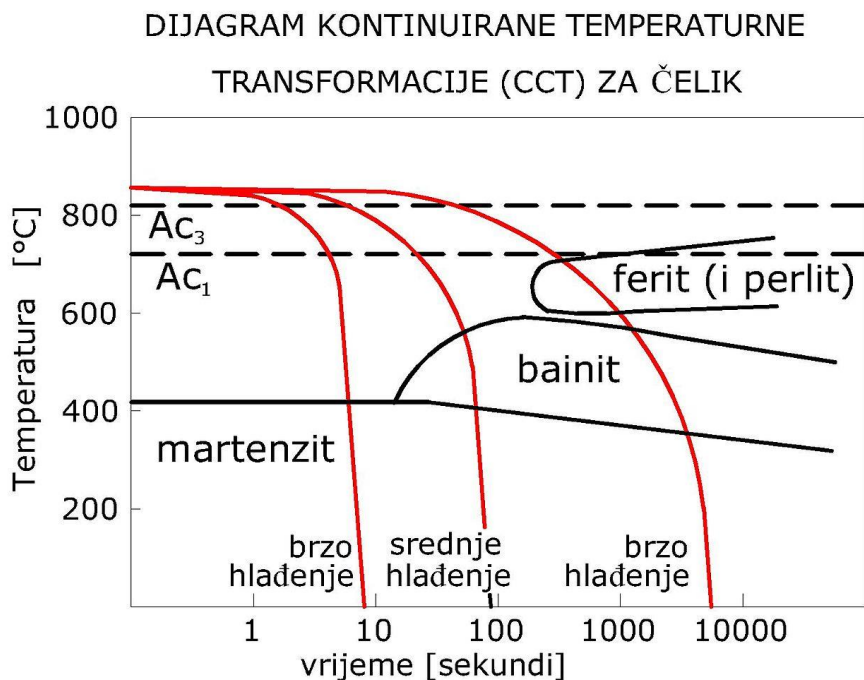
Postupci žarenja se dijele na dvije vrste: žarenje I. reda (žarenje za redukciju zaostalih naprezanja i rekristalizacijsko žarenje) te na žarenje II. reda (sferoidizacijsko žarenje, normalizacijsko žarenje, žarenje na grubo zrno te homogenizacijsko žarenje). Svaki od tih postupaka se koristi za određene materijale te svaki imaju svoj cilj. Također svaki od tih postupaka ima različite temperature ugrijavanja (slika 3) te im je to i ključna stvar po kojoj se razlikuju. No, sve vrste žarenja imaju i nekoliko zajedničkih ciljeva:

- Izjednačavanje kemijskog sastava po presjeku
- Izjednačavanje strukture po presjeku
- Stvaranje stabilnih strukturnih faza
- Dobivanje strukture bez zaostalih naprezanja. [4, 5]



Slika 3. Dijagram temperatura ugrijavanja za postupke žarenja [3]

Temperatura na koju grijemo obradak kod žarenja naziva se prema vrsti žarenja. Na primjer kod normalizacije se ona naziva temperaturom normalizacije. Međutim, kod većine važnijih postupaka toplinske obrade, čelik se zagrijava na temperaturu pri kojoj je mikrostruktura austenitna ili se sastoji od austenita s malim udjelom drugih mikrostrukturnih sastojaka, na primjer karbida (cementit). Ta temperatura se naziva temperaturom austenizacije. Za većinu postupaka toplinskih obrada austenit je središnja, najvažnija mikrostruktura iz koje se nakon različitih pretvorbi postižu mikrostrukture koje su postojane na sobnoj temperaturi ili pri povišenim temperaturama i o kojima ovise svojstva čelika. Pretvorbe austenita provode se izotermno ili pri ohlađivanju. [5]



Slika 4. Dijagram kontinuirane temperaturne transformacije za čelik [2]

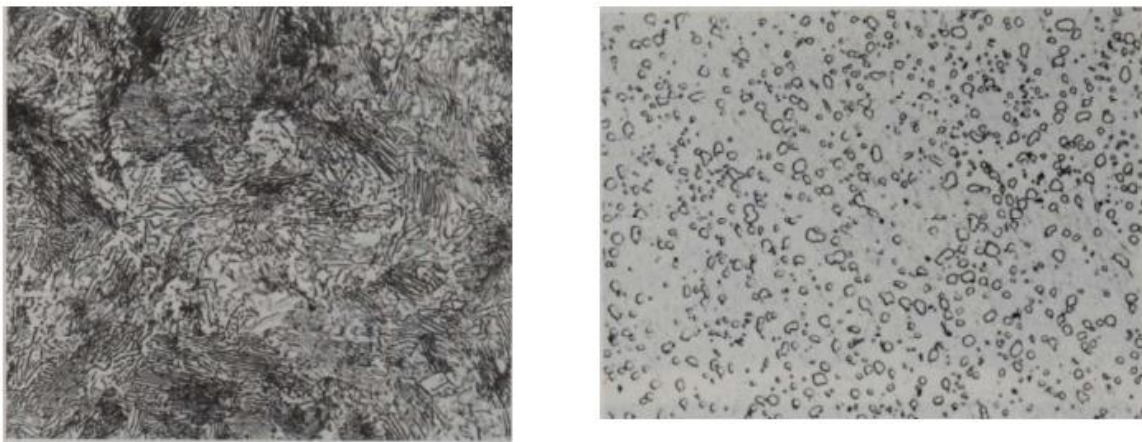
Kod ugljičnih čelika, austenit se pretvara u perlit od temperature oko 723 °C do temperature približno 500 °C, a ispod te temperature do 250 °C, ali samo pri izotermnoj pretvorbi, nastaje bainit, a ispod 250 °C nastaje martenzit.

Mehanička i tehnološka svojstva čelika s perlitnom mikrostrukturom ovise o debljini listića (lamela) cementita, odnosno o tzv. međulamelarnom razmaku. Što je on manji, to su viša mehanička svojstva i duktilnost, a za rezivost (obradivost) vrijedi obrnuto. Perlit koji nastaje pri višim temperaturama (blizu 700 °C) grubolamelaran je, a onaj koji nastaje kod donje granice ima malen međulamelarni razmak (sitnolamelarni perlit). Svojstva martenzita i bainita ovise o masenom udjelu ugljika u čeliku. To posebice vrijedi za martenzit koji postiže najveću tvrdoću (oko 65 HRC) kad je udio ugljika oko 0,6%. Martenzit kojemu je udio ugljika malen, npr. 0,1%, ima mnogo manju tvrdoću (oko 37 HRC). S povišenjem temperature nastali mikrostrukturni sastojci počinju se mijenjati. To se najviše opaža kod martenzita, gdje promjene počinju već pri temperaturama između 100 °C i 200 °C i postaju očitije s povišenjem temperature prema temperaturi Ac_1 (popuštanje čelika). Martenzit legiranih čelika otporniji je prema popuštanju nego martenzit ugljičnih čelika. Na slici 4 može se vidjeti ovisnost mikrostrukture čelika o brzini hlađenja. [5]

2.1. Sferoidizacijsko žarenje

Sferoidizacijsko žarenje ili meko žarenje je postupak koji se provodi radi omogućavanja lakše obrade čelika (prvenstveno rezanjem i deformiranjem). Postupak se sastoji od ugrijavanja na temperaturu A_1 , duljeg držanja te vrlo sporog hlađenja. Podeutektoidni čelici se griju na temperaturu malo nižu od A_1 , dok se nadeutektoidni čelici griju na temperaturu malo višu od A_1 . Brzina hlađenja je $v_{hl} = 30 - 50$ K/h, a sredstvo hlađenja je zrak. [3]

Fizikalna osnova procesa sferoidizacije objašnjava se djelovanjem površinskih napetosti u smislu nastajanja kuglastih oblika (oblik kugle ima najmanju površinu – najmanju površinsku energiju za dani volumen kristalnog zrna). Djelovanjem površinske napetosti lamele postaju sve kraće i deblje tako da na kraju postupka prelaze u približno kuglasti oblik. Primjer takve pretvorbe može se vidjeti na slici 5 gdje je prikazana mikrostruktura čelika 50CrMoV4 prije i poslije sferoidizacijskog žarenja. Konačna struktura su kuglice cementita u feritnoj matrici.

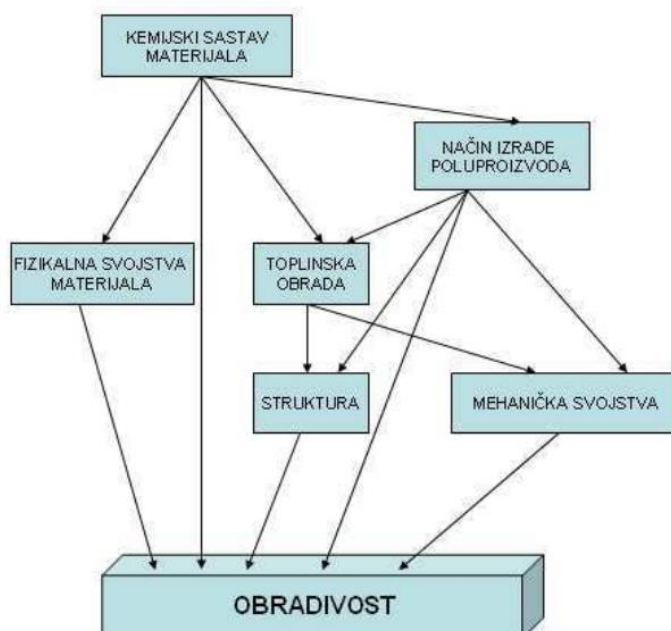


Slika 5. Mikrostruktura 50CrMoV4 prije i poslije sferoidizacijskog žarenja [3]

Sferoidizacijskim žarenjem dobivamo najmanju tvrdoću materijala uz maksimalnu žilavost. Također dobivamo i najbolju plastičnost materijala te najbolju rezljivost materijala. Najbolja rezljivost se posebno vidi prilikom obrade čelika s više od 0,5 % ugljika. [3]

3. OBRADIVOST

Obradivost je osnovna tehnološka karakteristika materijala kojem se izražava njegova pogodnost za obradu. Obradivost ne možemo kvantificirati i nema jedinstvene metodologije njenog određivanja. Ona se procjenjuje skupom kriterija obradivosti ili funkcija obradivosti [8]. Osnovni skup funkcija obradivosti kod obrade odvajanjem čestica čine: funkcija postojanosti oštrice reznog alata, funkcija sila rezanja, funkcija kvalitete obrađene površine, funkcija oblika odvojene čestice. Također mogu se definirati i dodatne funkcije obradivosti poput volumena odvojenog materijala u jedinici vremena, temperature pri obradi, sklonosti stvaranju naslaga, pogodnost za suhu obradu, mogućnost i cijena reciklaže itd. (slika 6). [9]

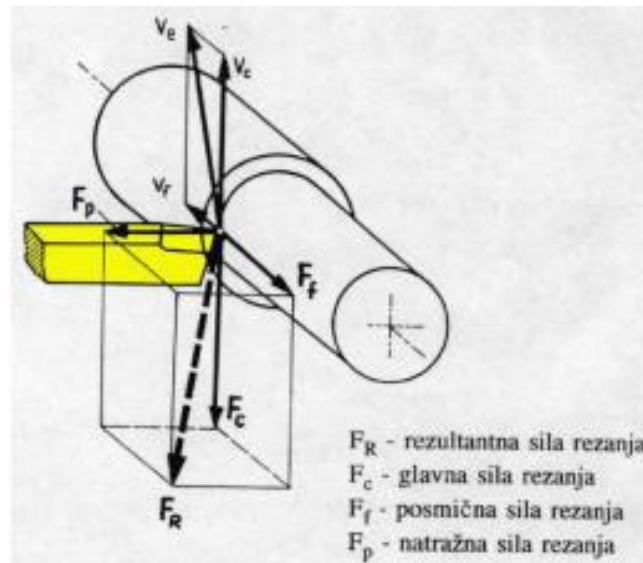


Slika 6. Shematski prikaz faktora koji utječu na obradivost [8]

3.1. Sile rezanja

Dva su razloga zašto se kao kriterij obradivosti koriste sile rezanja. Prvi proizlazi iz definicije obradivosti koja glasi da je obradivost lakoća obrade nekog materijala što implicira da materijal kroz koji alat lakše prodire ima bolju obradivost. Drugi razlog je povezan s cijenom obrade nekog materijala. Pošto su sile rezanja direktno povezane s snagom, a samim tim i potrošnjom energije, bolje obradivim materijalom smatra se onaj za čiju obradu se potroši manje energije. [10]

Raspored sila kod tokarenja može se vidjeti na slici 7. Rezultantna sila rezanja je vektorski zbroj glavne sile rezanja, posmične sile rezanja te natražne sile rezanja.



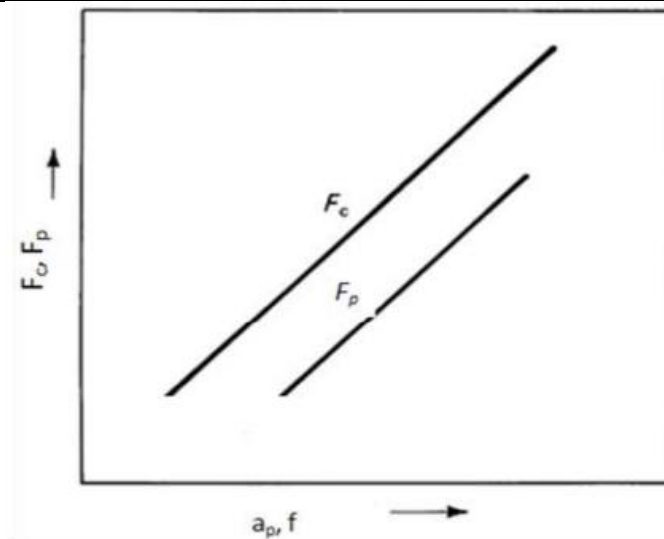
Slika 7. Sile kod tokarenja

3.1.1. Utjecajni faktori na sile rezanja

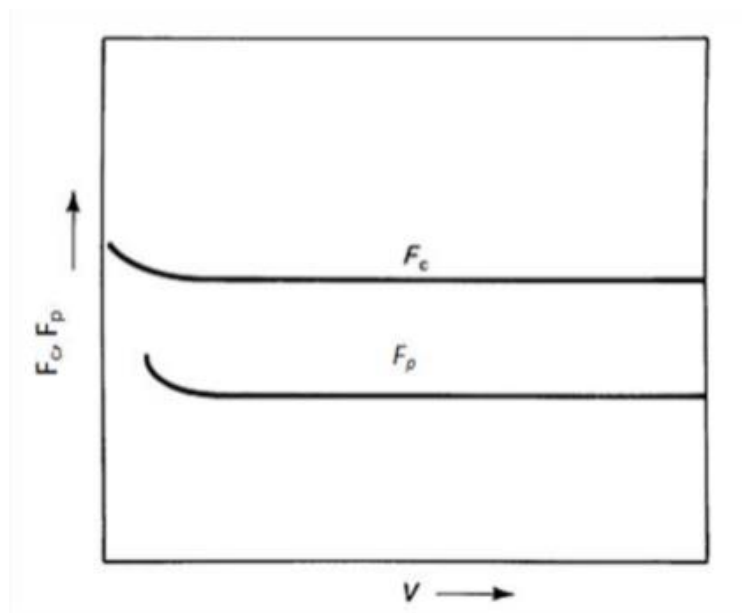
Postoji puno faktora koji utječu na promjenu vrijednosti sile rezanja, a neki od njih su:

- materijal obratka,
- brzina rezanja,
- posmak,
- dubina rezanja,
- geometrija alata,
- sredstvo za hlađenje i podmazivanje (SHIP),
- materijal alata,
- istrošenje alata.

Naravno da neki faktori imaju veći utjecaj na obradivost, a neki manji. Takav primjer se može vidjeti na slici 8 i na slici 9. Povećanjem dubine rezanja i posmaka, sile linearno rastu. Kod brzine rezanja je stvar dosta drugačija. Povećanjem brzine rezanja, sile rezanja se smanjuju do određene vrijednosti te nakon toga ostaju iste. [11]



Slika 8. Ovisnost sila rezanja o dubini rezanja i posmaku [11]



Slika 9. Ovisnost sila rezanja o glavnoj brzini [11]

Kod utjecaja materijala obratka, skoro uvijek zapažamo da su sile rezanja veće kod materijala sa većom čvrstoćom, ali to povećanje nije proporcionalno povećanju čvrstoće. Uzrok te pojave je u tome, da se povećanjem tvrdoće materijala smanjuje njegova plastičnost, pa je zato i sabijanje manje. Faktor sabijanja smanjuje se kada se povećava kut prednje površine, ali različito za različite materijale (tablica 1) [12].

Tablica 1. Relativna snaga potrebna za obradu pojedinih materijala

| Materijal obratka | Relativna snaga |
|-------------------|-----------------|
| Mg legure | 1,0 |
| Al legure | 1,8 |
| Bronca | 2,3 |
| Sivi lijev | 3,5 |
| Čelik | 6,3 |
| Ti legure | 7,6 |
| Ni legure | 10,0 |

3.1.2. Određivanje sile rezanja

Nakon određivanja vrijednosti posmaka i dubine rezanja, potrebno je iste provjeriti s aspekta sile rezanja. Najbrži način proračuna sile rezanja je analitički način. Međutim, najtočniji način je eksperimentalno određivanje konstanti i eksponenata u proširenim izrazima za sile rezanja. Proračun sile rezanje je neophodno izvršiti s aspekta dvije najvažnije činjenice:

- provjera prethodno odabranih vrijednosti posmaka i dubine rezanja i
- proračun snage rezanja, te na taj način odabiranje odgovarajućeg alatnog stroja za izvršenje konkretne operacije.

Dva najčešća modela za određivanje sile su Kienzleov model i Merchant.

3.1.2.1. Kienzleov model određivanja sile

Analitički način proračuna sile rezanja vrši se pomoću izraza:

- korištenjem podataka o specifičnoj sili rezanja:

$$F_1 = k_s \cdot d_s^{1-z} \cdot s, \text{ N}$$

- korištenjem podataka o glavnim vrijednostima specifične sile rezanja:

$$F_1 = b \cdot d_s^{1-z} \cdot k_{s(1/1)}, \text{ N}$$

$$F_2 = b \cdot d_s^{1-x} \cdot k_{2(1/1)}, \text{ N}$$

$$F_3 = b \cdot d_s^{1-y} \cdot k_{3(1/1)}, \text{ N}$$

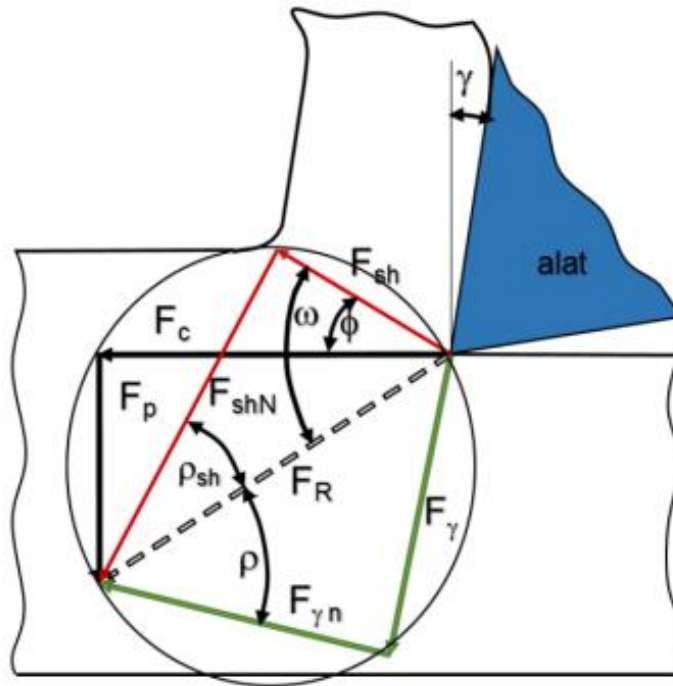
gdje je:

- k_s - specifična sila rezanja, MPa
- d - dubina rezanja, mm
- s - posmak, mm/okr
- b - širina strugotine, mm
- $k_{s(1/1)}$, $k_{z(1/1)}$, $k_{3(1/1)}$ - glavne vrijednosti specifične sile rezanja za glavnu, silu rezanja, silu posmičnog kretanja i silu prodiranja, MPa
- z , x , y - parametri koji definiraju promjenu specifične sile rezanja u zavisnosti od promjene debljine strugotine. [11]

3.1.2.2. Merchant – ortogonalno rezanje

Merchantov model ortogonalnog rezanja (slika 10) metala prikazuje ovisnost između kuta smične ravnine, prednjeg kuta oštrice i kuta trenja. Model se temelji na ovim pretpostavkama:

- smična zona ima oblik ravnine,
- nastaje kontinuirana strugotina,
- oštrica alata savršeno je oštra,
- protok materijala u zoni smicanja je plastičan,
- materijal predmeta obrade je nestlačiv. [9]



Slika 10. Merchantov model sila rezanja [9]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Za eksperimentalni dio rada korištena su dva uzorka od čelika C60, promjera 16 mm izrezana na duljinu 200 mm. Jedan uzorak je žaren, dok na drugom nije izvršena nikakva daljnja obrada. Ti uzorci su kasnije bili podvrgnuti obradi tokarenja te su se analizirale razlike u silama rezanja prilikom tokarenja, naknadna mikrostruktura oba uzorka te tvrdoća uzoraka.

Cilj eksperimenta je bio dokazati da žarenje čelika C60 poboljšava njegovu obradivost.

4.1. Žarenje uzorka

Postupku žarenja bio je podvrgnut jedan uzorak. Uzorak se žario u komornoj peći proizvođača „Končar d.o.o.“, a koja je prikazana na slici 11. Ta komorna peć je bez zaštitne atmosfere s automatskom regulacijom temperature. Maksimalna temperatura ugrijavanja peći je 1100 °C.



Slika 11. Komorna peć

Nakon što se uzorak stavi u peć, ona se počinje zagrijavati. Potrebna temperatura za sferoidno žarenje čelika C60 je 750 °C. Peći treba oko sat vremena da se zagrije na tu temperaturu. Nakon što se postigla zadana temperatura, uzorak se držao u peći iduća 4 sata na toj temperaturi (slika

12). Nadalje, peć se gasi, a uzorak ostaje u peći i hladi se brzinom 30 do 50 K/h. Ovom uzorku je trebalo 18 sati da se ohladi na sobnu temperaturu.



Slika 12. Uzorak u komornoj peći zagrijan na temperaturu za žarenje



Slika 13. Žareni uzorak nakon ohlađivanja

Nakon što se žareni uzorak ohladio, vanjski sloj je oksidirao, što je i vidljivo na slici 13. Zbog toga je s uzorka potrebno skinuti oksidirani sloj brus papirom. Uzorke nije teško razlikovati jer je razlika između žarenog i nežarenog uzorka je vidljiva golim okom, kao što je to vidljivo na slici 14.



Slika 14. Žareni uzorak (lijevo) i nežareni uzorak (desno)

4.2. Ispitivanje sila rezanja

Ispitivanje sila rezanja se vrši tako da uzorke podvrgnemo obradi odvajanjem, u ovom slučaju na tokarskom stroju te zatim pomoću uređaja za mjerenje snage stroja očitamo rezultate te daljnjim proračunima dobijemo silu rezanja.

4.2.1. Tokarski stroj

Za ovaj eksperiment je korišten tokarski stroj TES-3/2000 koji je prikazan na slici 15, a nalazi se u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Stroj je izrađen 1959. godine i težak je 1950 kg.

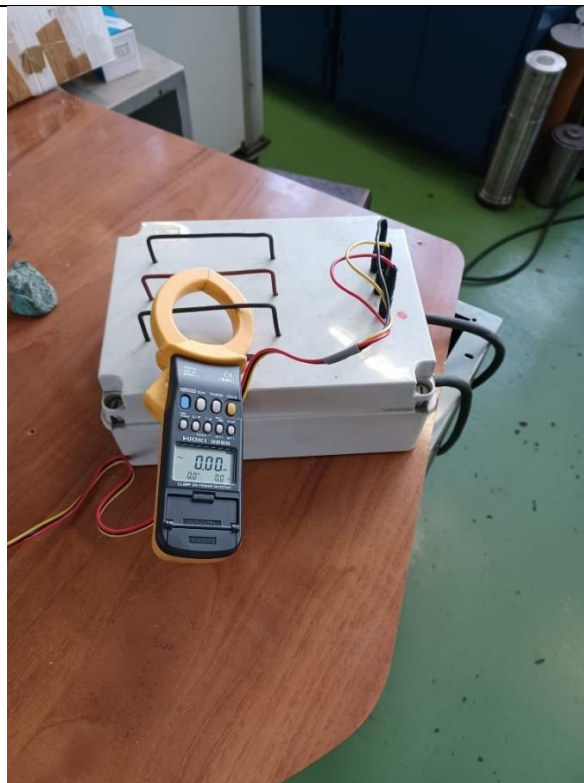


Slika 15. Tokarilica TES-3/2000

Tokarilicu TES-3/2000 karakterizira njezin radni prostor koji je promjera 500 mm i duljine 2000 mm, a snaga elektromotora je 3 kW. Iako je predviđena za obradu relativno kratkih obradaka, može obrađivati i duže obratke uz primjenu linete te ima mogućnost montiranja kopirnog sistema za kopirno tokarenje.

4.2.2. Uređaj za ispitivanje snage

Ispitivanje snage se provodilo pomoću uređaja HIOKI 3286 koji je prikazan na slici 16. Uređaj mjeri snagu stroja, a još mjeri i napon te jakost struje. Raspon mjerenja snage je u kilovatima, na jednu decimalu.



Slika 16. Uredaj HIOKI 3286 za ispitivanje snage stroja

4.2.3. Rezultati ispitivanja

Kao što je već rečeno u tekstu iznad, ispitivanje je provedeno na dva uzorka, jednom žarenom i jednom nežarenom uzorku. Na svakom su uzorku izvršene četiri obrade tokarenja s različitim parametrima. U svakoj novoj obradi se mijenjao ili posmak ili dubina obrade, a naknadno i promjer uzorka zbog izvršenih prethodnih obrada. Parametri prve obrade prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Parametri prve obrade

| Parametri | Vrijednosti |
|--------------------------------|-------------|
| Posmak, f | 0,12 mm/okr |
| Dubina rezanja, a_p | 1 mm |
| Promjer obradka, Φ | 16 mm |
| Početna snaga stroja, P_{ph} | 1,5 kW |

Kod prve obrade krenulo se s najmanjim posmakom, najmanjom dubinom rezanja te s najvećim promjerom obratka. Za takve vrijednosti parametara, očitane vrijednosti snage stroja su bile:

- Za nežareni uzorak: $P_B = 1,6$ kW
- Za žareni uzorak: $P_B = 1,5$ kW

Parametri druge obrade prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Parametri druge obrade

| Parametri | Vrijednosti |
|--------------------------------|-------------|
| Posmak, f | 0.12 mm/okr |
| Dubina rezanja, a_p | 2 mm |
| Promjer obradka, Φ | 16 mm |
| Početna snaga stroja, P_{ph} | 1,5 kW |

Kod druge obrade povećala se dubina rezanja, dok su ostali parametri ostali isti kao i kod prve obrade (tablica 3). Očitane vrijednosti snaga za ovu obradu bile su:

- Za nežareni uzorak: $P_B = 1,8$ kW
- Za žareni uzorak: $P_B = 1,8$ kW

Parametri treće obrade prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Parametri treće obrade

| Parametri | Vrijednosti |
|--------------------------------|-------------|
| Posmak, f | 0.24 mm/okr |
| Dubina rezanja, a_p | 1 mm |
| Promjer obradka, Φ | 14 mm |
| Početna snaga stroja, P_{ph} | 1,5 kW |

Kod treće obrade povećao se posmak, a smanjio promjer obradka u odnosu na prvu obradu (tablica 4). Očitane vrijednosti snaga za ovu obradu bile su:

- Za nežareni uzorak: $P_B = 1,8$ kW
- Za žareni uzorak: $P_B = 1,7$ kW

Parametri za četvrtu obradu prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Parametri četvrte obrade

| Parametri | Vrijednosti |
|--------------------------------|-------------|
| Posmak, f | 0.24 mm/okr |
| Dubina rezanja, a_p | 2 mm |
| Promjer obradka, Φ | 16 mm |
| Početna snaga stroja, P_{ph} | 1,5 kW |

Kod zadnje, četvrte obrade povećao se i posmak i dubina rezanja u odnosu na prvu obradu (tablica 5). Očitane vrijednosti za ovu obradu bile su:

- Za nežareni uzorak: $P_B = 2,3$ kW
- Za žareni uzorak: $P_B = 2,2$ kW

Može se primijetiti da se očitane vrijednosti snage potrebne za obradu nežarenog uzorka u odnosu na snagu potrebnu za obradu žarenog uzorka ne razlikuju značajno. Razlog tome je velika masa i snaga stroja u odnosu na mali promjer ispitivanih uzoraka. Također, problem je i što korišteni uređaj za mjerenje snage ima preciznost mjerenja na jednu decimalu. Stoga se ne može uočiti razlika manja od 100 W što je veliki raspon za takve uzorke poput ovih korištenih u radu.

4.3. Analiza mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće

Još jedan pokazatelj obradivosti je i tvrdoća materijala. Naravno, što je manja tvrdoća, materijal je pogodniji za obrađivanje. Oštrica se manje troši, a sile rezanja su manje.



Slika 17. Pila Mecatome T260

Prije ispitivanja tvrdoće, potrebno je napraviti pripremu uzoraka. Prvo se uzorci moraju izrezati te uzeti samo dio na kojem će se vršiti analiza mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće. Uzorci koji su korišteni u ovom eksperimentu su izrezani na pili Mecatome T260, koji je prikazan na slici 17, a nalazi se u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Ono po čemu se ova pila ističe od drugih je u ohlađivanju obradka, SHIP-u. Jako je bitno da se uzorci pravilno hlade da ne dođe do prevelikog zagrijavanja, a shodno tome i do promjene mikrostrukture materijala. Nakon što je uzorak izrezan, slijedi daljnja priprema uzoraka.

4.3.1 Priprema uzoraka za očitavanje mikrostrukture

Izerazni uzorci se nakon piljenja uzimaju i stavljaju u polimernu masu (slika 18). Polimerna masa se sastoji od smole i praha.



Slika 18. Izrezani uzorci u polimernoj masi

Nakon toga uzorci se bruse i poliraju. To se vrši na stroju Mecatech 250 koji je prikazan na slici 19, a također se nalazi u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogranje Sveučilišta u Zagrebu. Brušenje se vrši tako da se krene od najgrubljeg zrna brusnog papira prema najfinijem zrnju brusnog papira. Početni brusni papir ima granulaciju 120, zatim 320, pa 600, 1000, 2400 i završni najfiniji brusni papir ima granulaciju 4000.

Nakon toga slijedi uklanjanje tragova brušenja. To se vrši poliranjem u dva koraka. U prvom koraku, sredstvo za poliranje je dijamantna pasta za poliranje veličine zrna 3 mikrometra. U drugom koraku sredstvo za poliranje je tekuća smjesa koja ima ulogu dijamantne paste i lubrikanta te ima veličinu zrna 0,03 mikrometra.



Slika 19. Uređaj za brušenje Mecatech 250

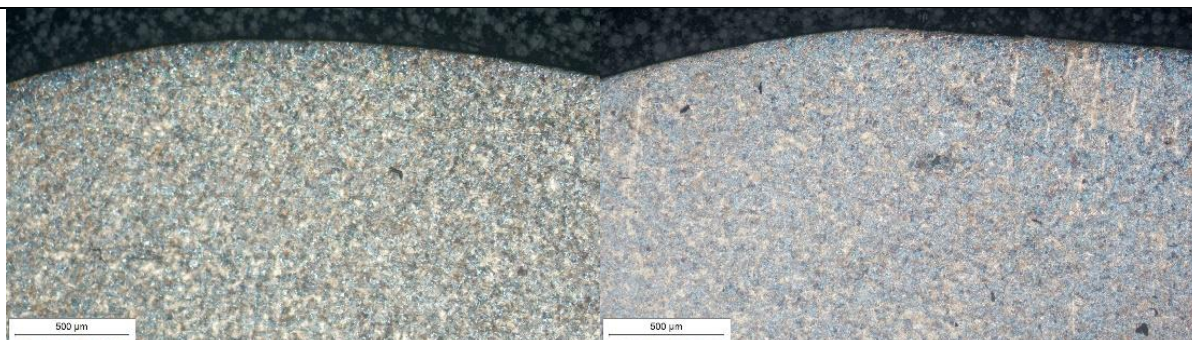
Nakon poliranja slijedi nagrizanje uzoraka. To se vrši tako da se uzorci urone u otopinu 3%-tnog nitala na 4 sekunde, a zatim se uranjaju u vodu da se ispere otopina te se nakon toga osuše papirom. Kad se završi sa tim postupcima, uzorci su spremni za analizu pod svjetlosnim mikroskopom u cilju određivanja mikrostrukture. Na slici 20 prikazan je korišteni svjetlosni mikroskop koji se nalazi u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogranje Sveučilišta u Zagrebu



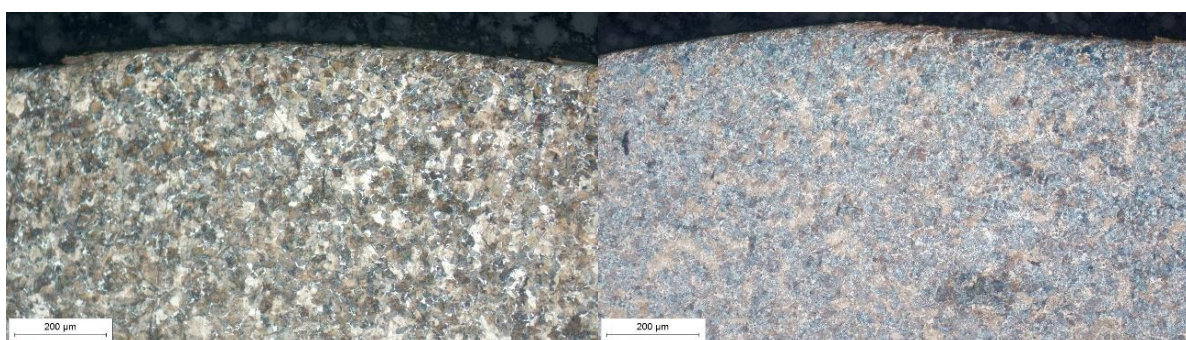
Slika 20. Svjetlosni mikroskop

4.3.2 Analiza mikrostrukture uzoraka

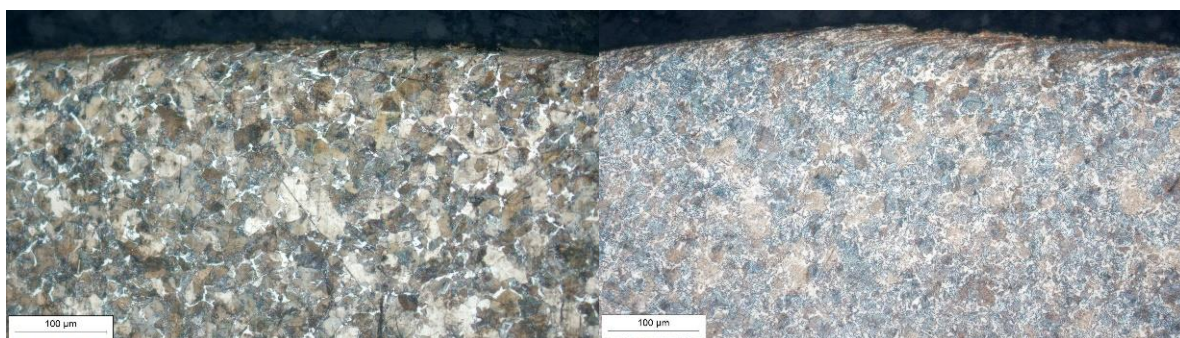
Za očitavanje mikrostrukture u ovom slučaju koristio se svjetlosni mikroskop s digitalnom kamerom, prethodno prikazan na slici 20. Uzorci su se slikali na rubu poprečnog presjeka te na sredini poprečnog presjeka. Slike su napravljene s povećanjima od 50, 100, 200 i 500 puta. Također, za sredinu poprečnog presjeka je napravljena još jedna slika s povećanjem od 1000 puta. Na slikama od 21 do 24 prikazana je mikrostruktura rubova uzoraka s povećanjima redom od 50, 100, 200 i 500 puta, s time da je na lijevoj strani svake slike nežareni uzorak, a s desne strane žareni uzorak.



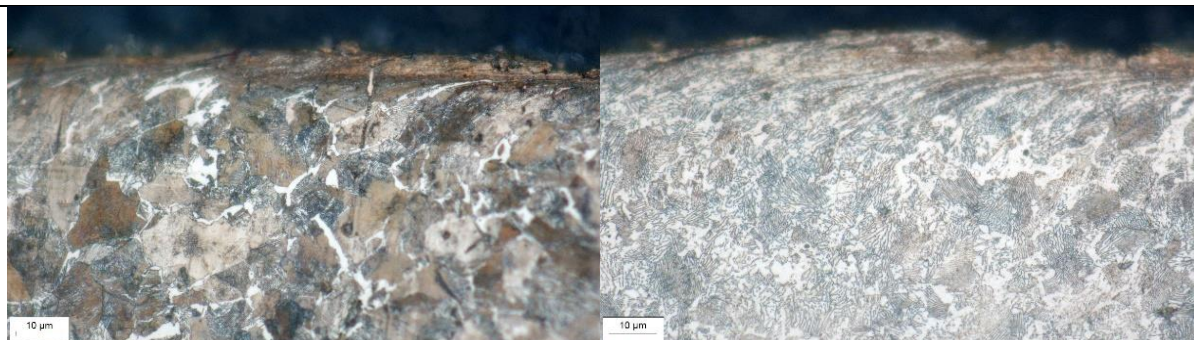
Slika 21. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 50x



Slika 22. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 100x

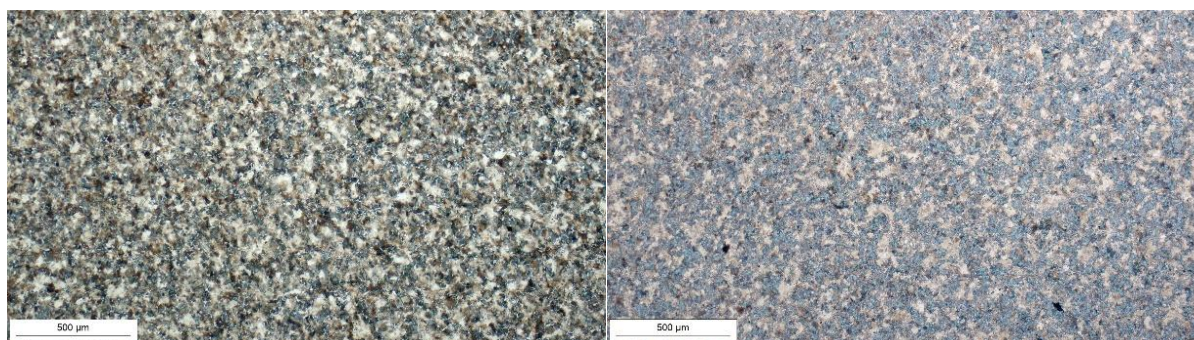


Slika 23. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 200x

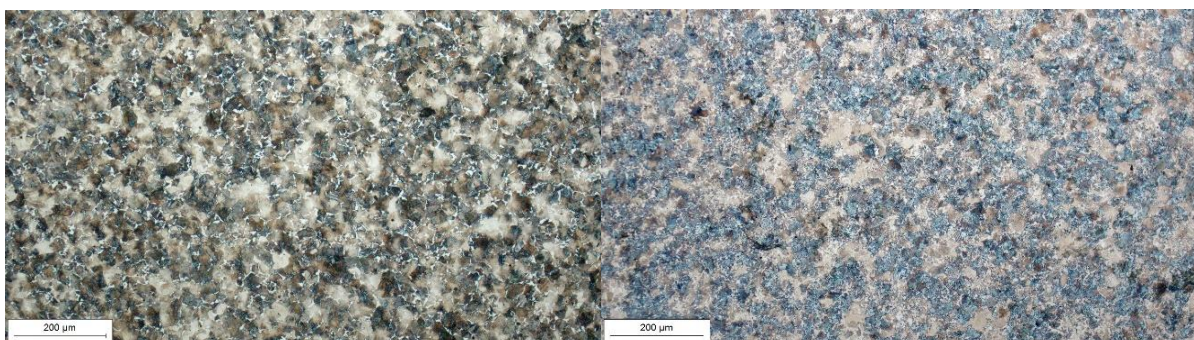


Slika 24. Rubovi nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 500x

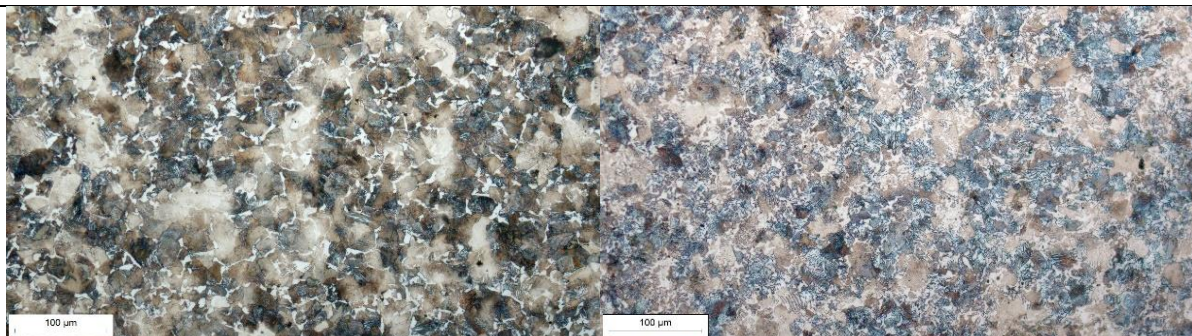
Na slikama od 25 do 28 prikazana je mikrostruktura jezgre uzoraka, također s povećanjima od 50, 100, 200 i 500 puta.



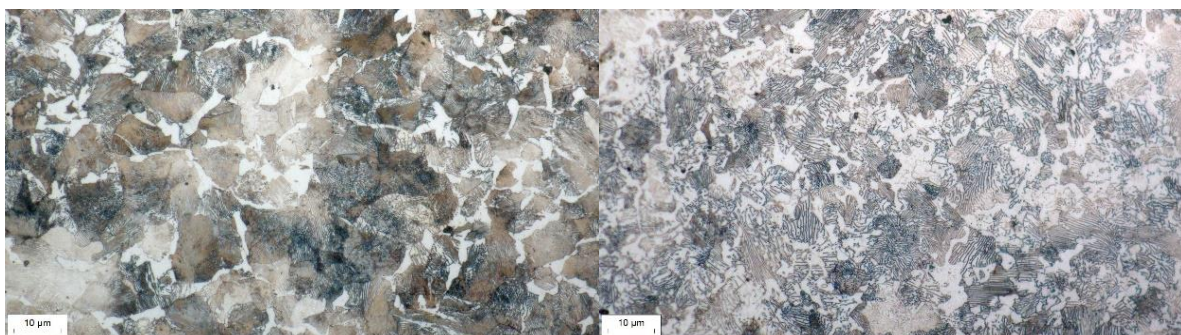
Slika 25. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 50x



Slika 26. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 100x

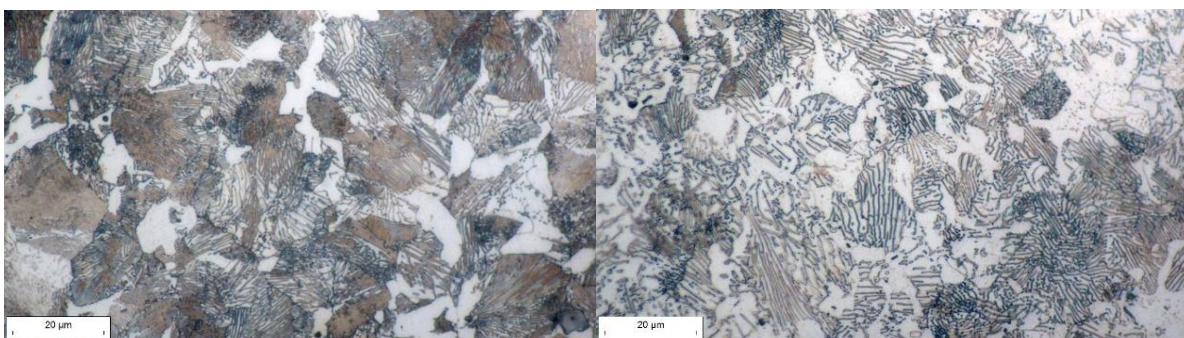


Slika 27. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 200x



Slika 28. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 500x

Na slici 29 prikazana je mikrostruktura jezgre oba uzorka s povećanjem od 1000 puta.



Slika 29. Jezgre nežarenog (lijevo) i žarenog uzorka (desno) pod povećanjem od 1000x

4.3.3 Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća je ispitivana na Vickers tvrdomjeru Wolpert Wilson Tukon 2100B koji je prikazan na slici 30, a nalazi se u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.



Slika 30. Vickers tvrdomjer Wolpert Wilson Tukon 2100B

Mjerenje je ispitano metodom HV1. Na svakom se uzorku provelo četiri mjerenja tvrdoće i izračunata je srednja vrijednost dobivenih rezultata. Uzorci su ispitani četiri puta da bi se dobila ponovljivost. Rezultati su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće

| Redni broj ispitivanja | Žareni uzorak | Nežareni uzorak |
|----------------------------|---------------|-----------------|
| 1. | 216 HV1 | 259 HV1 |
| 2. | 204 HV1 | 253 HV1 |
| 3. | 204 HV1 | 258 HV1 |
| 4. | 209 HV1 | 266 HV1 |
| Srednja vrijednost tvrdoće | 208 HV1 | 259 HV1 |

Iz dobivenih rezultata izračunava se srednja vrijednost tvrdoće koja za žareni čelik iznosi 208 HV1, dok za nežareni čelik iznosi 259 HV1. Vidljivo je da je tvrdoća žarenog čelika za 24% manja nego kod nežarenog čelika. Manja tvrdoća žarenog uzorka može se pripisati toplinskoj obradi žarenja kod koje je, zbog jako sporog ugrijavanja i hlađenja, došlo do promjene u samom obliku karbida u perlitnom zrnu.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada bio je pokazati utjecaj žarenja na obradivost čelika C60 te donijeti zaključke o parametrima obrade.

Nakon eksperimenta u kojem su se testirale sile rezanja teško se može donijeti pravi zaključak i uvid u razliku obradivosti između žarenog i nežarenog čelika. Razlog tome je što su se u eksperimentu koristili uzorci relativno male debljine. S obzirom na to da su ti mali uzorci obrađivani na tokarilici koja ima veliku masu i snagu, razlika u silama rezanja time postaje sve manja. U tri od četiri različite obrade dobile su se razliku u snagama od 0,1 kW, dok su se u jednoj obradi dobili čak i isti rezultati. Također bi se razlike sigurno bolje vidjele da uređaj za mjerenje snage može mjeriti barem dvije ili tri decimale. No ipak, koliko god te razlike bile male, one ipak postoje te se može zaključiti da bi one na većim uzorcima bile puno očitije. I s ovim malim razlikama u snagama potrebnima za obradu može se zaključiti da žareni čelik ima bolju obradivost od nežarenog čelika

Taj zaključak dokazuje i testirana tvrdoća oba uzorka. Smanjenje tvrdoće od 20% nakon žarenja uzorka je očita razlika. Manja tvrdoća također ukazuje na bolju obradivost, te se iz svega navedenog može zaključiti da je žarenje čelika C60 poboljšalo njegovu obradivost.

LITERATURA

- [1] <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Celik> (dostupno na dan 08.02.2022.)
- [2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_obrada#%C5%BDarenje (dostupno na dan 08.02.2022.)
- [3] Darko Landek: Predavanja; Toplinska obrada - postupci žarenja, Katedra za toplinsku obradu i inženjerstvo površina, FSB, 2020.
- [4] D. Krumes: Toplinska obradba, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2000.
- [5] I. Gabrić, S. Šitić: Materijali II, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- [6] Božidar Matijević: Toplinska obrada III; predavanja, Katedra za toplinsku obradu i inženjerstvo površina, FSB, 2015/16
- [7] Tihana Kostadin: Čelici i željezni lijevovi, Materijali II, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [8] Izidor Demeter: Utjecaj materijala obradka na hrapavost obrađene površine kod tokarenja, diplomski rad, FSB, 2012.
- [9] Toma Udiljak: Postupci obrade odvajanjem, predavanje, Katedra za alatne strojeve, FSB, 2020.
- [10] Leon Vladić: Primjer izbora matematičkog modela za sile rezanja kod tokarenja, diplomski rad, FSB, 2010.
- [11] Sabahudin Ekinović: Postupci obrade odvajanjem, Univerzitet u Sarajevu, Zenica, 2003.
- [12] Šavar, Š.: Obrada odvajanjem čestica, II dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1977
- [13] <https://1library.co/article/senzori-nadzor-obradnih-strojeva-i-procesa.yrk964vz> (dostupno na dan 09.02.2022.)
- [14] <https://www.tequipment.net/Hioki3286-20.html> (dostupno na dan 09.02.2022.)
- [15] R. Sunulahpašić, M. Oruč: Alatni čelici i ostali alatni materijali, Univerzitet u Zenici, Zenica, 2019.
- [16] A. Ševčík: High temperature strength analysis of low carbon steels in the As – Cast State, Institute of Materials Research of the SAS, Slovačka, 2005.

PRILOZI

I. CD-R disc