

# Utjecaj slobodnog kovanja i toplinske obrade na svojstva čelika

---

**Krčelić, Blanka**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:764013>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-28**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Blanka Krčelić

DIPLOMSKI RAD

Sisak, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Blanka Krčelić

UTJECAJ SLOBODNOG KOVANJA I TOPLINSKE OBRADNE NA  
SVOJSTVA ČELIKA

DIPLOMSKI RAD

Voditelj: izv. prof. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović  
Stručni voditelj: Željko Grubišić, mag. ing. met.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić - predsjednik  
izv. prof. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović - član  
izv. prof. dr. sc. Ivan Jandrić - član  
prof. dr. sc. Ladislav Lazić - zamjenski član

Sisak, rujan 2023.

IME: Blanka  
PREZIME: Krčelić  
MATIČNI BROJ: M-102/19

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

### **UTJECAJ SLOBODNOG KOVANJA I TOPLINSKE OBRADE NA SVOJSTVA ČELIKA**

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 15.9.2023.

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)

\_\_\_\_\_  
*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*



Istraživanja su provedena u sklopu projekata:

- VIRTULAB – Integrated laboratory for primary and secondary raw materials, KK.01.1.1.02.0022 i
- Centre for Foundry Technology – SIMET, KK.01.1.1.02.0020.

## **Zahvala**

*Zahvaljujem se svim profesorima, profesoricama i djelatnicima Metalurškog fakulteta koji su nesebično prenosili i dijelili svoja znanja i savjete tijekom cijelog mog studiranja.*

*Posebnu zahvalu upućujem svojoj mentorici izv.prof.dr.sc. Martini Lovrenić-Jugović, za svu pomoć prilikom izbora teme ovog diplomskog rada, na strpljenju, savjetima, prenesenom iskustvu, usmjeravanju i motivaciji pri pisanju rada. Hvala na poklonjenom vremenu, znanju i razumijevanju.*

*Zahvaljujem se Željku Grubišiću mag.ing.met. na svim objašnjenjima i pomoći u provedbi eksperimentalnog dijela istraživanja te Franji Kozini mag.ing.met. za provedbu metalografske analize.*

*Želim se zahvaliti svim kolegama i kolegicama koji su uljepšali dane mog studiranja i bez kojih ovo putovanje ne bi bilo toliko posebno.*

*Na kraju najveću zahvalu i priznanje želim iskazati svojoj obitelji koja je uvijek podržavala sve moje izbore, koji su nesebično pružali svu snagu i vjetar u leđa, i vjerovali u mene. Hvala vam na bezgraničnoj ljubavi i strpljenju. Hvala na pruženoj mogućnosti da svoje snove pretvorim u stvarnost.*

## SAŽETAK

### UTJECAJ SLOBODNOG KOVANJA I TOPLINSKE OBRADNE NA SVOJSTVA ČELIKA

Ovaj diplomski rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu dane su teorijske osnove mehanizama očvrnuća metalnih materijala, kovanja, podjele kovačkih strojeva, toplinske obrade te mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom. U eksperimentalnom dijelu rada na konstrukcijskom čeliku S275JR (Č.0451) trakastog oblika proveden je eksperiment slobodnog kovanja na mehaničkom kovačkom stroju s različitim brojem udaraca batom od: 2, 5, 10 i 20 puta. Dio uzoraka svakog stupnja deformiranosti podvrgnut je toplinskoj obradi koja se sastoji od zagrijavanja na 850 °C te naglog hlađenja u vodi. Nakon provedenog eksperimenta kovanja te kovanja i naknadne toplinske obrade na sabijenim uzorcima provedena je metalografska analiza te izmjerena tvrdoća Vickersovom metodom po uzdužnom presjeku kovanih traka. Provedena je analiza rezultata izmjerenih tvrdoća i metalografskih snimaka mikrostrukture, uzoraka nakon kovanja i uzoraka nakon kovanja i toplinske obrade. Zaključuje se da se povećanje tvrdoće i smanjenje veličine zrna dešava nakon kovanja i naknadne toplinske obrade s povećanjem stupnja deformiranosti.

**Ključne riječi:** slobodno kovanje, konstrukcijski čelik, toplinska obrada, tvrdoća, metalografska analiza

## SUMMARY

### INFLUENCE OF FREE FORGING AND HEAT TREATMENT ON STEEL PROPERTIES

This master's thesis consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical section provides the theoretical foundations of the mechanisms of strengthening metallic materials, forging, classification of forging machines, heat treatment, and hardness measurement using the Vickers method. In the experimental part of the study, an experiment involving free forging was conducted on structural steel S275JR (Č.0451), in strip form, using a mechanical forging machine with varying numbers of hammer blows: 2, 5, 10, and 20 times. A portion of the samples from each level of deformation underwent heat treatment, which involved heating to 850°C followed by rapid quenching in water. After the forging experiment, as well as forging followed by subsequent heat treatment on compacted samples, metallographic analysis was performed, and Vickers hardness was measured along the longitudinal cross-section of the forged strips. An analysis of the measured hardness results and metallographic microstructure images was conducted for samples after forging, as well as samples after forging and subsequent heat treatment. It is concluded that an increase in hardness and a reduction in grain size occur after forging and subsequent heat treatment with an increase in the degree of deformation.

**Keywords:** free forging, structural steel, heat treatment, hardness, metallographic analysis

# SADRŽAJ:

|   |    |
|---|----|
| POPIS OZNAKA I KRATICA .....  | I  |
| POPIS SLIKA .....   | II |
| POPIS TABLICA .....   | IV |
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 2. TEORIJSKI DIO .....  | 3  |
| 2.1. Mehanizmi očvrnuća metalnih materijala .....                             | 3  |
| 2.2. Kovanje .....  | 5  |
| 2.2.1. Kovački strojevi .....   | 6  |
| 2.2.1.1. Batovi .....   | 7  |
| 2.2.1.2. Preše .....  | 10 |
| 2.2.1.3. Horizontalni kovački strojevi .....                                  | 12 |
| 2.2.2. Postupci slobodnog kovanja .....                                       | 13 |
| 2.2.2.1. Sabijanje .....  | 13 |
| 2.2.2.2. Iskivanje i raskivanje .....   | 13 |
| 2.2.2.3. Savijanje .....  | 14 |
| 2.2.2.4. Odsijecanje .....  | 14 |
| 2.2.2.5. Probijanje .....   | 15 |
| 2.3. Toplinska obrada .....   | 15 |
| 2.3.1. Kaljenje .....   | 17 |
| 2.3.2. Načini hlađenja austenita .....  | 19 |
| 2.4. Mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu .....                               | 21 |
| 2.5. Opći odnos između čvrstoće i tvrdoće .....                               | 24 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO .....  | 25 |
| 3.1. Konstrukcijski čelik .....   | 25 |
| 3.2. Eksperiment kovanja .....  | 26 |
| 3.3. Rezanje uzoraka nakon kovanja .....                                      | 27 |
| 3.4. Toplinska obrada .....   | 29 |
| 3.5. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu .....                 | 30 |
| 3.6. Mjerenje tvrdoće .....   | 34 |
| 4. REZULTATI I RASPRAVA .....   | 36 |
| 4.1. Metalografska analiza .....  | 36 |
| 4.1.1. Rezultati metalografske analize nakon kovanja .....                    | 37 |
| 4.1.2. Rezultati metalografske analize nakon kovanja i toplinske obrade ..... | 39 |
| 4.1.3. Usporedba rezultata metalografske analize .....                        | 42 |
| 4.2. Tvrdoća metodom po Vickersu .....  | 45 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.2.1. | Tvrdoća nakon kovanja.....                     | 45 |
| 4.2.2. | Tvrdoća nakon kovanja i toplinske obrade ..... | 50 |
| 4.2.3. | Usporedba rezultata tvrdoća .....              | 55 |
| 5.     | ZAKLJUČAK.....                                 | 57 |
| 6.     | LITERATURA.....                                | 58 |
|        | ŽIVOTOPIS.....                                 | 60 |

## POPIS OZNAKA I KRATICA

| Oznaka /<br>Kratika | Jedinica          | Opis oznake / kratice  |
|---------------------|-------------------|--|
| $\alpha$            |                   | ferit  |
| $\gamma$            |                   | austenit   |
| $\varepsilon_r$     | -                 | relativni stupanj deformacije  |
| $A$                 | mm <sup>2</sup>   | površina utisnutog plašta piramide   |
| $A_1$               | °C                | temperatura eutektoidne pretvorbe  |
| $A_3$               | °C                | temperatura podeutektoidne pretvorbe   |
| $A_{cm}$            | °C                | temperatura nadeutektoidne pretvorbe   |
| CW                  | %                 | mjera plastične deformacije  |
| $d$                 | mm                | srednji iznos dijagonala otiska  |
| $d_1$               | mm                | prva dijagonala otiska   |
| $d_2$               | mm                | druga dijagonala otiska  |
| $F$                 | N                 | sila pritiska indentora  |
| $g_n$               | m/s <sup>2</sup>  | ubrzanje zemljine sile teže  |
| $h_0$               | mm                | početna visina (debljina) trake  |
| $h$                 | mm                | visina (debljina) trake  |
| HV                  | -                 | tvrdoća po Vickersu  |
| $k$                 | s <sup>2</sup> /m | konstanta koja je recipročna vrijednosti ubrzanja zemljine sile teže ( $g_n$ ) |
| K                   | -                 | kovanje  |
| $M_f$               | °C                | temperatura završetka stvaranja martenzita                                     |
| $M_s$               | °C                | temperatura početka stvaranja martenzita                                       |
| $R^2$               | -                 | koeficijent determinacije  |
| $R_m$               | MPa               | vlačna čvrstoća  |
| $R_{p0.2}$          | MPa               | konvencionalna granica razvlačenja   |
| $S$                 | mm <sup>2</sup>   | površina   |
| $S_0$               | mm <sup>2</sup>   | površina početnog presjeka   |
| $S_d$               | mm <sup>2</sup>   | površina nakon deformiranja  |
| $t_A$               | °C                | temperatura austenitizacije  |
| TO                  | -                 | toplinska obrada   |
| TTT                 | -                 | dijagram Time Temperature Transformation                                       |

## POPIS SLIKA

- Slika 1. Proizvodi izrađeni kovanjem [5]: a) klipnjača, b) ključevi i c) zupčanici
- Slika 2. Utjecaj %CW (hladnog deformiranja) [8]: a) na naprezanje i deformaciju za niskougljični čelik, b) na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i veličinu zrna
- Slika 3. Kovanje [11]: a) slobodno i b) u ukovnju
- Slika 4. Polužni (perni) bat [13]
- Slika 5. Gravitacijski bat na dasku [13]
- Slika 6. Shema jednoradnog/gravitacijskog bata za slobodno kovanje [5]
- Slika 7. Bat za kovanje u ukovnjima [13]
- Slika 8. Parni bat [13]
- Slika 9. Hidraulična preša [14]
- Slika 10. Tarna preša [13]
- Slika 11. Koljenasta preša [2]
- Slika 12. Horizontalni kovački stroj [2]
- Slika 13. Prikaz postupaka sabijanja sirovca [16]
- Slika 14. Prikaz iskivanja [15]
- Slika 15. Prikaz savijanja [15]
- Slika 16. Prikaz odsijecanja [15]
- Slika 17. Prikaz probijanja [15]
- Slika 18. Dijagram postupka toplinske obrade [19]
- Slika 19. Područje optimalnih temperatura austenitizacije za kaljenje ugljičnih čelika [21]
- Slika 20. TTT–dijagram (zeleni) konstruiran pomoću metastabilnog Fe-Fe<sub>3</sub>C (crveni) i Uptonova (plavi) dijagrama za podeutektoidni čelik [21]
- Slika 21. Krivulja hlađenja za izotermičko (lijevo) i kontinuirano (desno) hlađenje [21]
- Slika 22. Prikaz kontinuiranog ohlađivanja jednog austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika u pripadnom TTT-dijagramu [21]
- Slika 23. Tvrdomjer i njegove komponente [25]
- Slika 24. a) Vickers-ov dijamantni stožac s vršnim kutom od 136° b) shema geometrije indentora [26]
- Slika 25. Utiskivanje indentora [27]
- Slika 26. Korišten kovački stroj (mehanički polužni perni bat)
- Slika 27. Kovanje uzorka
- Slika 28. Trakasti uzorci nakon kovanja uz oznaku broja udaraca batom
- Slika 29. Rezanje uzoraka tračnom pilom
- Slika 30. a) shema poprečnog rezanja uzorka, b) izrezani uzorci tračnom pilom
- Slika 31. a) shema uzdužnog rezanja uzorka, b) rezalica Buehler ABRASIMET
- Slika 32. Postavljanje uzorka u stege
- Slika 33. Izrezani uzorci: lijevi stupac za analizu i desni stupac za toplinsku obradu
- Slika 34. Označeni uzorci: a) postavljeni na podložak, b) umetnuti u elektro peć i c) zagrijavani u elektro peći
- Slika 35. Uzorci: a) zagrijani u elektro peći i b) naglo ohlađeni u vodi
- Slika 36. a) uređaj za vruće izostatsko prešanje (Buehler SimpliMet 1000), b) postavljanje razrezanog uzorka u uređaj
- Slika 37. Uzorci nakon prešanja u vodljivu masu
- Slika 38. Uređaj za brušenje i poliranje "BUEHLER Phoenix Beta"
- Slika 39. Postupak: a) brušenja uzoraka, b) poliranja uzoraka
- Slika 40. Metalografski svjetlosni mikroskop Leica Ortholux

- Slika 41. Ispolirani i očišćeni uzorci
- Slika 42. Nagrizanje nital-om
- Slika 43. Invertni metalografski mikroskop Olyimpus GX51 s digitalnom kamerom DP70
- Slika 44. Uređaj Mituyoto
- Slika 45. Mjerenje dijagonala otiska
- Slika 46. Područja mjerenja tvrdoće sabijanih uzoraka
- Slika 47. Položaji uzimanja metalografskih snimaka po uzorku
- Slika 48. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon kovanja pri povećanju 50x
- Slika 49. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon kovanja pri povećanju 200x
- Slika 50. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon kovanja pri povećanju 50x
- Slika 51. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon kovanja pri povećanju 200x
- Slika 52. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 50x
- Slika 53. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 200x
- Slika 54. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 50x
- Slika 55. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 200x
- Slika 56. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka pri povećanju 100x
- Slika 57. Metalografski snimci sredine uzoraka pri povećanju 100x
- Slika 58. Položaji utiskivanja indentora
- Slika 59. Shema prikaza donje baze na prostornom dijagramu za svaki uzorak
- Slika 60. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja
- Slika 61. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja
- Slika 62. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja
- Slika 63. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja
- Slika 64. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za sredinu po visini trake nakon kovanja
- Slika 65. Ovisnost vrijednosti tvrdoća na sredini gore po svakom uzorku o relativnom stupnju deformacije pri kovanju
- Slika 66. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća uzoraka o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju
- Slika 67. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja i toplinske obrade
- Slika 68. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja i toplinske obrade
- Slika 69. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja i toplinske obrade
- Slika 70. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja i toplinske obrade
- Slika 71. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za sredinu po visini trake nakon kovanja i toplinske obrade
- Slika 72. Ovisnost vrijednosti tvrdoća na sredini gore po svakom uzorku o relativnom stupnju deformacije nakon kovanja i toplinske obrade
- Slika 73. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća uzoraka o relativnom stupnju deformacije nakon kovanja i toplinske obrade
- Slika 74. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća gornjeg ruba o različitom stupnju deformiranosti nakon kovanja (K) te nakon kovanja i naknadne toplinske obrade (K+TO)



## POPIS TABLICA

- Tablica 1. Primijenjena sila i potrebna oznaka uz izmjerenu tvrdoću metodom po Vickersu [28]
- Tablica 2. Kemijski sastav čelika S275JR+AR (Č.0451) u mas.% prema EN 10025-2
- Tablica 3. Podaci eksperimenta kovanja
- Tablica 4. Parametri brušenja i poliranja uzoraka čelika uložениh u masu
- Tablica 5. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja
- Tablica 6. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja
- Tablica 7. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja
- Tablica 8. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja
- Tablica 9. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja i toplinske obrade
- Tablica 10. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja i toplinske obrade
- Tablica 11. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja i toplinske obrade
- Tablica 12. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja i toplinske obrade

## 1. UVOD

Oblikovanje metala deformiranjem je najstariji način oblikovanja metala i njihovih legura koje se provodi s ciljem izmjene oblika i dimenzija proizvoda koji pri tom procesu postižu odgovarajuća fizička i mehanička svojstva. Skoro sve metale i njihove legure možemo oblikovati deformiranjem. Danas se ovim postupcima prerađuje cca 85 % proizvedenog čelika i preko 90 % obojenih metala i njihovih legura [1].

Određeni metali postižu visok stupanj plastičnosti i mogu se dobro valjati, prešati, kovati i izvlačiti u hladnom stanju. Pri navedenim postupcima dolazi do povećanja čvrstoće materijala tj. do očvrnuća materijala. Očvrnuće hladnom deformacijom nastaje zbog umnožavanja dislokacija u kristalnoj strukturi pri čemu se one isprepleću. Na taj način novo unesene dislokacije postojećim dislokacijama otežavaju gibanje time otežavaju plastično tečenje materijala [2-4].

Kovanje ima široku primjenu u svim granama metaloprerađivačke industrije. Otkivci u odnosu na dijelove izrađene lijevanjem imaju bolju homogenost materijala i sitnoznatiju strukturu, bolju kvalitetu površine, bolju točnost dimenzija time i veću dinamičku čvrstoću materijala. Proizvodi izrađeni kovanjem prikazani su na slici 1 [5].



Slika 1. Proizvodi izrađeni kovanjem [5]: a) klipnjača, b) ključevi i c) zupčanici

Konstruktivski čelici se koriste kod izrade mnogih konstrukcijskih strojnih dijelova koji u nekom sklopu obavljaju svoju funkciju. Ti dijelovi uglavnom prenose sile, okretno momente, spajaju elemente konstrukcija i slično. Najčešće su to osovine, vratila, zupčanici, opruge, vijci, nosači, poklopci, kućišta i dr. Kako bi ovi konstrukcijski elementi obavljali svoju funkciju moraju biti zadovoljavajućih mehaničkih svojstava. Mnogi moraju biti otporni na trošenje, udarno i dinamičko opterećenje. Cilj povećanja tvrdoće konstrukcijskog čelika promatran je u ovom radu.

Povećanje čvrstoće čelika može se postići različitim mehanizmima, a u ovom radu primijenjen je mehanizam očvrnuća hladnim deformiranjem ostvaren slobodnim kovanjem te postupak toplinske obrade koji uključuje zagrijavanje i naglo hlađenje uzoraka tj. kaljenje. Postupak slobodnog kovanja podrazumijeva postupak kod kojeg se materijal pod utjecajem vanjske sile plastično deformira u ravnini okomitoj na pravac djelujuće sile. Pri tome se visina komada u pravcu djelujuće sile smanjuje, a ostale dimenzije u ravnini okomitoj na djelujuću

silu povećavaju. Prema brzini sabijanja razlikuje se prešanje (postupno djelovanje sile) i kovanje (djelovanje sile u obliku udaraca) [6, 7].

U ovom diplomskom radu proveden je eksperiment kovanja u hladnom stanju trakastih uzoraka konstrukcijskog čelika S275JR (Č.0451) pri različitim brojevima udara batom što rezultira različitim stupnjevima deformacije. Jedan dio kovanih uzoraka svih stupnjeva deformacije bio je podvrgnut toplinskoj obradi nakon kovanja. Cilj ovog diplomskog rada je pomoću tvrdomjera izmjeriti tvrdoću metodom po Vickersu svakog sabijenog uzorka i promjenu prikazati u ovisnosti o stupnju deformacije za uzorke nakon eksperimenta kovanja i nakon kovanja i naknadne toplinske obrade. U radu je provedena i metalografska analiza mikrostrukture nakon eksperimenta kovanja i nakon kovanja i naknadne toplinske obrade koja se povezala s izmjerenim tvrdoćama.

## 2. TEORIJSKI DIO

U ovom diplomskom radu proveden je eksperiment hladne deformacije slobodnog kovanja na trakastim uzorcima konstrukcijskog čelika, a potom na prethodno otkovanom komadu odrađena je toplinska obrada koja se sastoji od zagrijavanja i naknadnog hlađenja u vodi tj. kaljenja. U oba mehanizma dolazi do ometanja kretanja dislokacija.

Dislokacije su linijske (jednodimenzijske) nesavršenosti kristalne građe a tumače se kao narušena periodičnost strukture duž neke kristalne linije. Svako kočenje (ili otežano gibanje) dislokacija za posljedicu ima i povećanje čvrstoće, tj. povećanu otpornost na promjenu oblika [4].

### 2.1. Mehanizmi očvršnuća metalnih materijala

U inženjerskoj praksi česta je potreba za primjenom materijala koji posjeduju visoku čvrstoću, ali i dovoljnu duktilnost. Poznato je da prilikom povećanja čvrstoće materijala opada njegova duktilnost. Kemijski sastav i strukturu čelika treba tako podesiti da se dovoljno oteža gibanje dislokacija.

Kemijski sastav u kombinaciji s određenom termomehaničkom obradom daje ciljanu mikrostrukturu čelika koja pokazuje određena mehanička svojstva. Naknadnom termomehaničkom obradom moguće je dodatno mijenjati mikrostrukturu materijala te time utjecati na promjenu mehaničkih svojstava.

Postoji više različitih mehanizama koji mogu biti uključeni u ometanje kretanja dislokacija, odnosno pri postizanju visoke čvrstoće, a to su [4]:

- očvršnuće promjenom kemijskog sastava
- očvršnuće promjenom mikrostrukture
  - očvršnuće hladnom obradom,
  - očvršnuće kaljenjem i naknadnim popuštanjem,
  - precipitacijsko očvršnuće (legure),
  - očvršnuće promjenom veličine zrna,
  - relaksacija, rekristalizacija i rast zrna.

Sposobnost materijala da se deformira ovisi o sposobnosti gibanja dislokacija. Mehanizmi koji ograničavaju područje u kojima se dislokacije mogu kretati ili stvaraju fizičku prepreku dislokacijama povećavaju čvrstoću materijala. Obično, očvršnuće materijala smanjuje njegovu deformabilnost [7].

S obzirom da je u ovom radu proveden eksperiment hladnog deformiranja time će i teorijski dio biti usmjeren na očvršnuće hladnom deformacijom.

Kad se metal hladno oblikuje deformiranjem, povišuje se koncentracija dislokacija do  $\sim 10^{12}$  po  $\text{cm}^2$ . Zbog energetskih razloga dislokacije se ne mogu stvarati na površini kristala, pa mora postojati mehanizam koji omogućuje stvaranje dislokacija u unutrašnjosti kristala.

Prema Franku i Readu, izvor dislokacija jest u jednoj zatvorenoj dislokaciji koja je samo djelomično u ravnini klizanja, pa se zbog toga ne može gibati. Zbog naprezanja nametnutog oblikovanjem, dio zatvorene dislokacije u ravnini klizanja savine se i tako nastaje novi dislokacijski prsten, dok se izvorne dislokacije vraća u prvobitno stanje pa zbog nametnutog naprezanja može ponovo stvoriti novu dislokaciju [7].

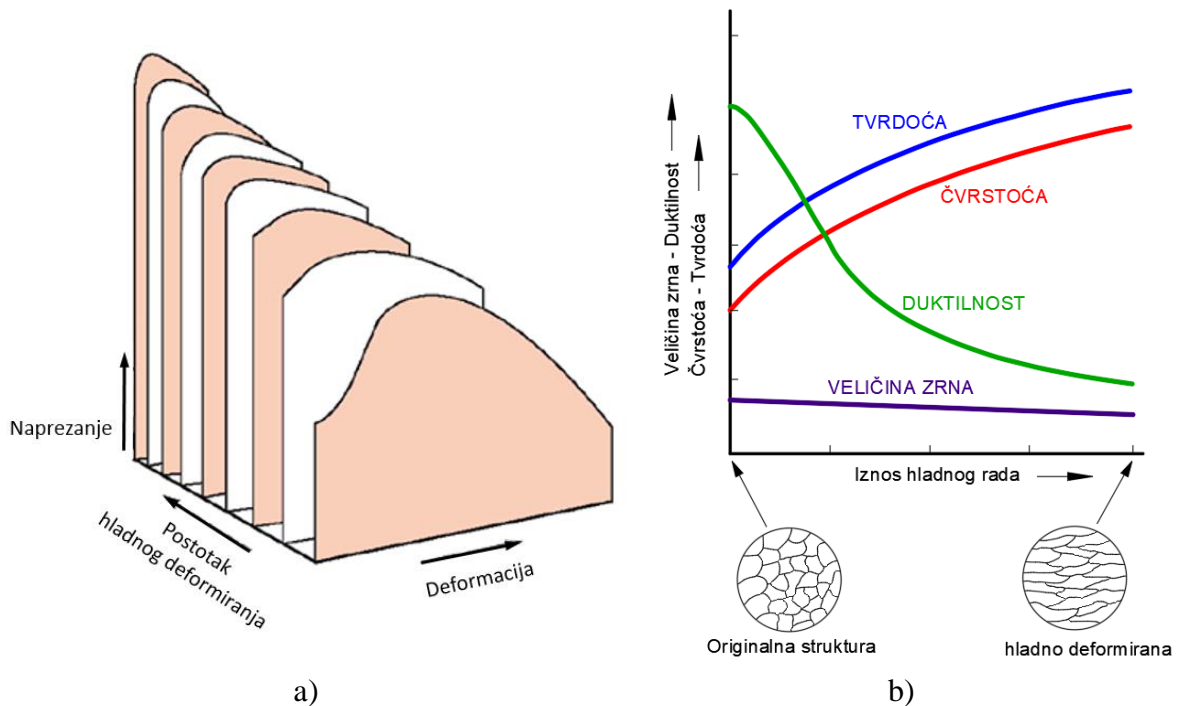
Tečenje materijala koje je započelo pri nekom određenom naprezanju ne nastavlja se ako to naprezanje ostaje konstantno. Za povećanje deformacije potrebno je stalno rastuće naprezanje.

U početnom stadiju oblikovanja deformiranjem izvori dislokacija aktivirani naprezanjem proizvode samo nekoliko novih dislokacija koje se ne mogu dalje gibati jer ih zaustavljaju barijere u rešetki (dislokacije postavljene okomito na ravninu klizanja, uključci itd.). Novonastale dislokacije sprečavaju svojim poljem naprezanja dalje aktiviranje izvora pa se klizanje može nastaviti samo povećanjem naprezanja.

Hladnom obradom materijala povećava se broj dislokacija, što uzrokuje povećanje granice tečenja. Prosječni razmak između dislokacija se smanjuje i one počinju blokirati gibanje drugih dislokacija. Postotak hladnog očvrnuća izražava se stupnjem plastične deformacije

$$\% CW = \left( \frac{S_o - S_d}{S_o} \right) \cdot 100$$

gdje je  $S_o$  početna površina presjeka, a  $S_d$  površina nakon deformiranja, %CW je samo još jedna mjera plastične deformacije. Na slici 2a prikazan je utjecaj povećanja stupnja plastične deformacije ostvarenog hladnim deformiranjem na naprezanje i deformaciju za niskouglični čelik. Na slici 2b prikazan je utjecaj stupnja deformacije na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i veličinu zrna.

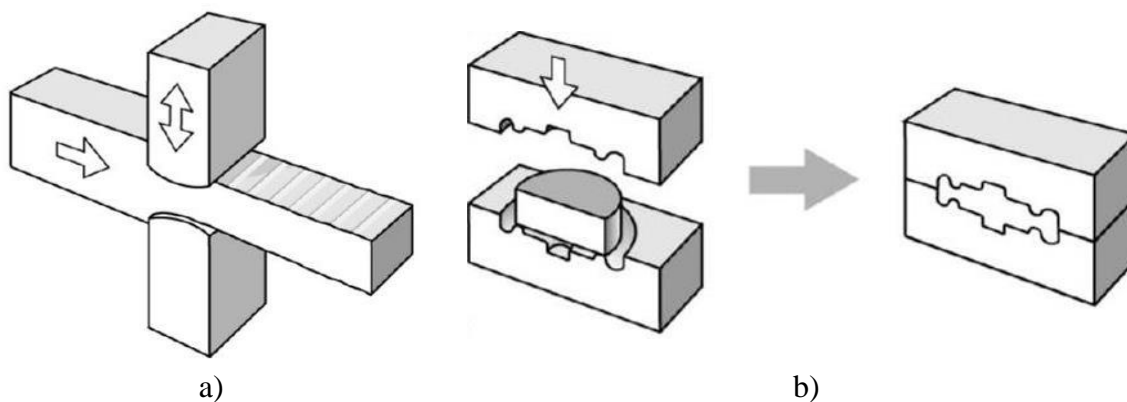


Slika 2. Utjecaj %CW (hladnog deformiranja) [8]: a) na naprezanje i deformaciju za niskouglični čelik, b) na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i veličinu zrna

Iz slike 2 vidljivo je da povećanjem stupnja plastične deformacije hladnim deformiranjem (%CW) dolazi do povećanja granice popuštanja (tečenja)  $R_{p0.2}$ , vlačne čvrstoće  $R_m$ , ali i do smanjenja deformabilnosti materijala tj. materijal postaje krhak.

## 2.2. Kovanje

Kovanje metala primjenjivalo se od davnina i bilo je jedno od najraširenijih postupaka proizvodnje alata, oružja i nakita. Kovanje je proces plastične deformacije metala do koje dolazi uslijed djelovanja primijenjene sile. Prilikom procesa kovanja dolazi do oblikovanja i obrade metalnog materijala u željeni oblik i dimenzije. Izvodi se u hladnom ili toplom stanju ovisno o karakteristikama i namjeni obratka, odnosno konačnog proizvoda. Male dimenzije otkivaka mogu se čak kovati i na sobnim temperaturama. Kovanje se najčešće povezuje s radom u vrlo visokim temperaturnim uvjetima, jer se metali uglavnom lakše oblikuju pri povišenim temperaturama, i to je češći oblik korištenja. Prilikom proizvodnje obradaka malih masa ili uz korištenje visokodeformabilnih materijala kovanje se izvodi u hladnom stanju. Time se postiže bolja kvaliteta površine te veća točnost dimenzija proizvoda. Za kovanje metala u hladnom stanju potrebna je viša sila prilikom udarca i zadovoljavajuća duktilnost materijala koji se obrađuje. Prema obliku tlačnih ploha alata razlikuje se: slobodno kovanje, uglavnom s ravnim tlačnim plohami, i kovanje u tzv. ukovnju (kalup, matrica), tj. dvodijelnom alatu kojemu su plohe prostorno oblikovane prema obliku proizvoda, što je prikazano na slici 3. Tlačna sila deformira metalni uložak (sirovac) postizući željene dimenzije i oblik gotovog proizvoda [9, 10].



Slika 3. Kovanje [11]: a) slobodno i , b) u ukovnju

Pri slobodnom kovanju materijal se slobodno širi i izdužuje u horizontalnim smjerovima, pa proizvod (otkivak) nema točne izmjere ni sasvim ravne plohe. Takvo je npr. ručno kovanje (sabijanje, iskivanje, raskivanje, kovačko probijanje i savijanje) te strojno kovanje na batovima i na vretenastim, mehaničkim i hidrauličnim prešama radi poboljšanja strukturnih i mehaničkih svojstava materijala (prokivanje).

Kovanjem u ukovnju izradak se oblikuje postupno, višekratnim kovanjem u sve dubljoj udubini (gravuri) namjenski izrađenog ukovnja, čime mu se oblik postupno približava konačnom. Kako ukovanj svojim stranicama ograničava širenje materijala, dobiva se otkivak ravnih ploha i točnih izmjera, pa ga nije potrebno dodatno obrađivati. Tim se načinom serijski proizvode npr. ključevi za odvrtanje matica, ojnice ili stapajice klipnih strojeva i dr. [11].

Kovanje pripada skupini volumenskog oblikovanja gdje zbog tlačnog opterećenja alatom na sirovac dolazi do naprezanja i deformacija u sve tri osi. Budući da se često radi o proizvodima velikih masa i dimenzija, u većem broju slučajeva izvodi se u toplom stanju. Tada se povećava deformabilnost materijala i značajno se smanjuju sile i rad koji su potrebni za odgovarajući stupanj deformacije. Loša strana kovanja u toplom stanju je stvaranje oksida uslijed zagrijavanja materijala. Stvoreni oksid onečišćuje površinu te dovodi do gubitka mase. Što su vrijeme i temperatura zagrijavanja veći, količina oksida raste. Prisutnost oksida predstavlja opasnost od njihovog uvlačenja dublje ispod površine što može uzrokovati lom uslijed opterećenja. Kako bi se to spriječilo, sloj oksida se redovito odstranjuje lakim sabijanjem odnosno udarcem. Prilikom toga, krhkost oksida omogućuje lako odvajanje od površine materijala. Osim na količinu oksida, moramo obratiti pažnju i na eventualne izmjene u sastavu površinskog sloja zagrijavanog materijala. Tijekom više temperature i dužeg vremena zagrijavanja, čelici s većim udjelom ugljika se lako razugljičuju u površinskom sloju. To može negativno utjecati na gotov otkivak, odnosno na svojstva njegove površine [9, 12]

### **2.2.1. Kovački strojevi**

U proizvodnom procesu kovanja sudjeluju: materijal, koji od sirovca prelazi u fazi obrade u otkivak i stroj. Stroj ima zadatak da na određeni način unese potrebnu energiju ili silu u materijal i time osigura deformabilnost materijala do konačnog željenog oblika gotovog proizvoda.

S obzirom na konstrukciju i način rada, kovačke strojeve za plastično oblikovanje možemo podijeliti u tri glavne skupine [2]:

- a) batove;
- b) preše;
- c) horizontalni kovački strojevi.

Otkivkom se nazivaju gotovi proizvodi dobiveni kovanjem na batu, dok se otpreskom smatraju proizvod dobiveni kovanjem na preši. Razlika je u brzini alata ovisno o korištenom stroju. Materijali koji ne podnose nagle promjene oblika, poput udaraca na batovima, potrebno je postepeno preoblikovati na prešama. Iz tog razloga konstruktivna rješenja alatnih strojeva prilagođavaju se materijalu proizvoda - batovima koji otkivak obrađuju udarcima, odnosno prešama koje postepeno preoblikuju otpresak povećavanjem pritiska, te ga zadržavaju konstantnim određeno vrijeme [5].

Značajke kovačkih strojeva su [12]:

- brzine malja kod batova kreću se u trenutku udarca od 4 do 7 m/s, što znači da su i brzine deformacije na batovima nekoliko puta veće nego na frikcijskim i koljenastim prešama, a znatno veće nego na sporim hidrauličkim prešama;
- kod kovanja u ukovnjima je zadržavanje oblikovanog metala u ukovnju na batovima kraće nego na prešama, što povoljno utječe na vijek trajanja skupog ukovnja;
- snažni udarci bata po ukovnju skraćuju vijek trajanja ukovnja;
- miran rad preša rezultira boljom točnošću otkivka i duljim radnim vijekom ukovnja, za razliku od batova koji udarcima izazivaju vibracije koje štetno djeluju na okolinu;
- obrada na batu je brža i ekonomičnija. Batovi su jeftiniji od preša za iste učinke.

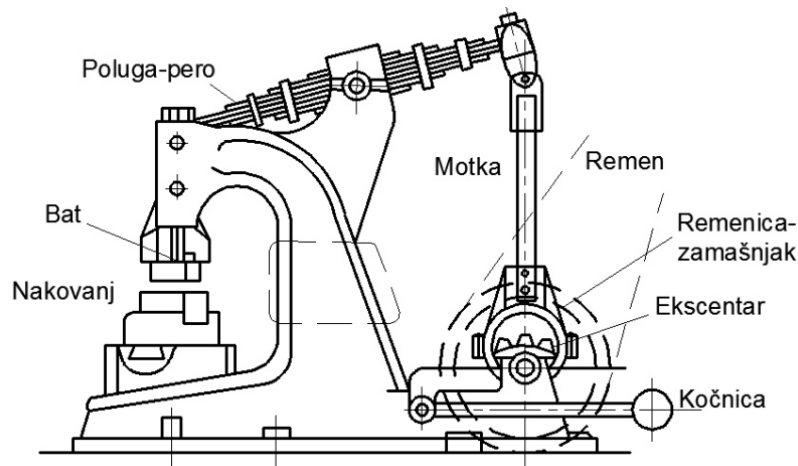
### 2.2.1.1. Batovi

Batovi predstavljaju prve strojeve za oblikovanje metala deformiranjem. Imaju najširu primjenu u tehnologiji kovanja u toplom stanju jer ih karakterizira visoki stupanj univerzalnosti, jednostavna konstrukcija i zadovoljavajuća trajnost. Brzine malja klasičnih batova su velike i uobičajeno se kreću od 4 do 7 m/s, a danas idu i do 9 m/s. Kovanje na batovima obavlja se pod djelovanjem više udaraca maljem tijekom kojeg materijal teče slobodno ili ispunjava gravuru ukovnja, ovisno o tome koji postupak se izvodi. Prema načinu na koji se vrši pokretanje malja razlikujemo [2]:

- a) mehaničke batove;
- b) pneumatske batove;
- c) parne batove.

#### a) mehanički batovi

Najčešće upotrebljavane vrste mehaničkih batova su: polužni perni batovi (slika 4.) i gravitacijski batovi.



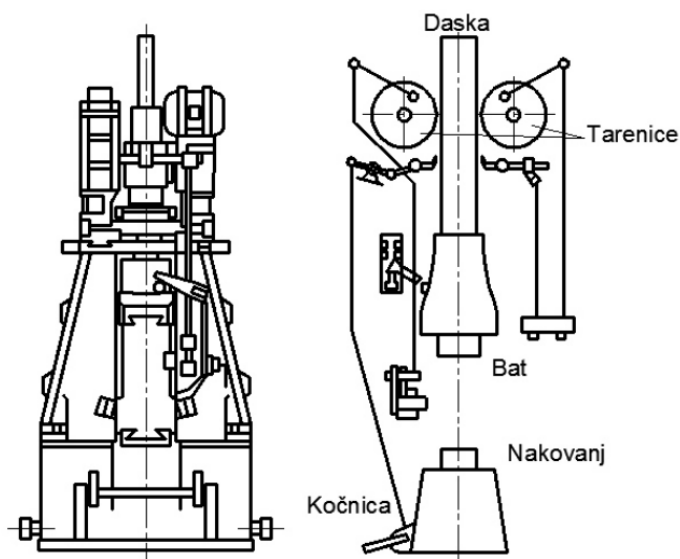
Slika 4. Polužni (perni) bat [13]

Na slici 4 je prikazana konstrukcija polužnog tzv. pernog bata, kod kojeg je radna poluga izvedena od čeličnih lamela. Motka, također izvedena od čeličnih traka, povezuje polugu s ekscentrom i vrši njezino zakretanje tako da djeluje opružno. Ovi se batovi izrađuju za mase maljeva od 40 do 250 kg, te za  $\geq 120$  udaraca u minuti. Maksimalan broj udaraca zavisi o konstrukciji stroja, a obično ne prelazi 200 udaraca u minuti. Vrlo su podesivi za slobodno kovanje plitkih predmeta kao što su razni noževi, djetla, turpije te ostali alat za kućanstvo i poljoprivredu [5].

Polužni bat se primjenjuje za kovanje manjih predmeta u serijskoj proizvodnji ili remontnim radionicama. Sastoji se od sloja lisnatih opruga, učvršćenih svojim središnjim dijelom za postolje stroja. Jedan kraj opruge spojen je za bat, a drugi za ekscentar polugu koja pokreće elektromotor. Pri okretanju poluge naviše, opruga se pod opterećenjem savija, dok se bat podiže. Kada se opruga nalazi u svom najvišem položaju, bat se zbog tromosti (inercije) podiže, savijajući pri tom lisnatu oprugu. Pri spuštanju se pod djelovanjem opruge, koja teži da se naglo rastereti, brzina padanja bata povećava.



Gravitacijski batovi jedna su od podvrsta mehaničkih batova, koji se mogu podijeliti prema načinu podizanja malja. Najčešće izvedbe su: bat na dasku (slika 5), bat na remen i bat na lanac [10].

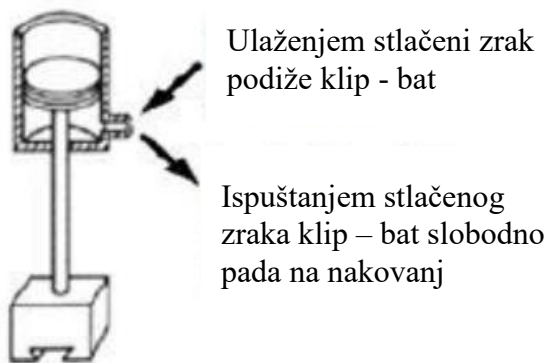


Slika 5. Gravitacijski bat na dasku [13]

Bat na dasku je mehanički gravitacijski bat koji se sastoji od bata spojenog na dasku koju podižu dvije suprotno rotirajuće tarenice. Ovakvi batovi postižu veliku točnost i preciznost izratka. Masa padajućih dijelova iznosi od 200 kg do 1.5 t, a postižu se brzine udarca između 4-7m/s. Može se ostvariti do 60 udaraca u minuti pri nižim visinama dizanja bata (do 1m) [10].

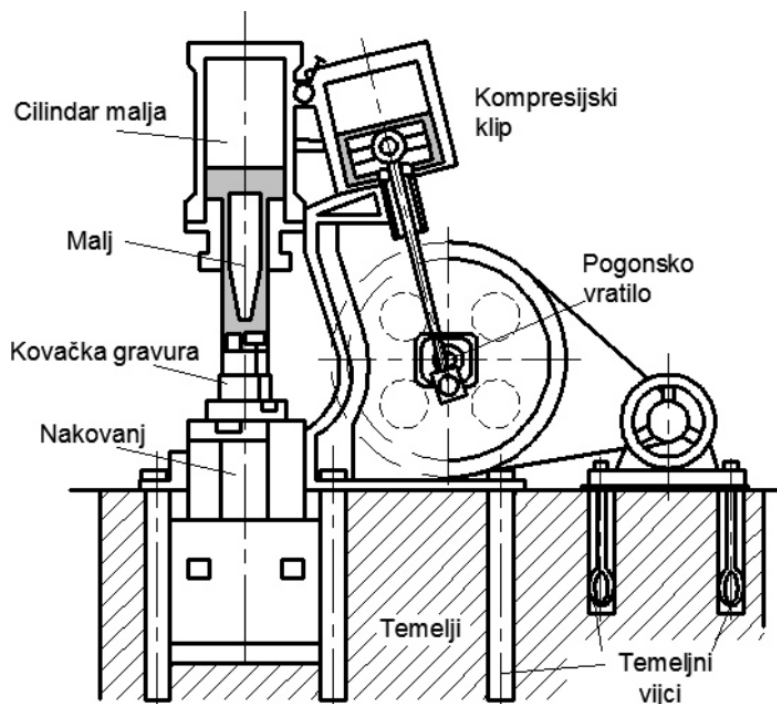
**b) pneumatski batovi**

Pneumatski batovi dijele se na: jednoradne – gravitacijske batove, dvoradne batove i protuudarne batove. Jednoradni batovi spadaju u grupu gravitacijskih batova namijenjenih slobodnom kovanju. Sastoje se od jednoradnog cilindra u kojem se podiže klip, tj. bat stlačenim zrakom. Taj stlačen zrak se ispušta otvaranjem ventila te dolazi do pada bata na nakovanj djelovanjem gravitacije [5]. Takav jednoradni – gravitacijski bat za slobodno kovanje prikazan je na slici 6.



Slika 6. Shema jednoradnog/gravitacijskog bata za slobodno kovanje [5]

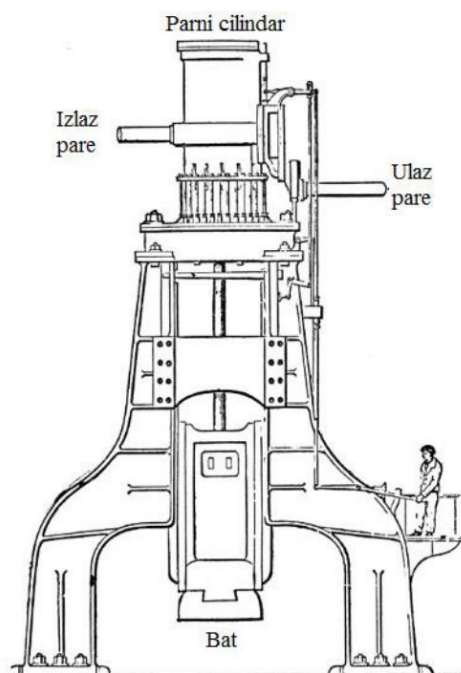
Dvoradni pneumatski bat se koristi za slobodno kovanje. Stlačeni zrak osigurava kompresor relativno niskog pritiska koji se obično izrađuje u konzolnoj izvedbi. Mase maljeva su od 50 do 1000 kg. Broj udaraca se kreće do 300 u minuti. Nakovanj je izveden u jednom dijelu je monolitna konstrukcija ili od više dijelova kod većih batova. S obzirom na izvedbu potrebno je postavljanje odgovarajućeg izolacijskog materijala za smanjenje prenošenja vibracija u okoliš kao i njegovo temeljenje. Služi i za kovanje u ukovnjima, a brzina malja tada ne ovisi o hodu, već o tlaku unutar cilindra. Kovanje u ukovnjima zahtjeva veće tlakove čime je konstrukcija bata masivnija, dvoradni pneumatski bat prikazan je na slici 7 [13].



Slika 7. Bat za kovanje u ukovnjima [13]

### c) parni batovi

Dvoradni batovi na paru su masivni batovi za kovanje odljevaka velikih dimenzija koji zahtijevaju mnogo prostora oko nakovnja. Mogu biti izvedeni u portalnoj konstrukciji, konzolnoj ili kao polužni batovi. Princip rada im je isti kao i kod pneumatskih dvoradnih batova s razlikom što se pune predgrijanom parom. Punjenje cilindra kod teških udaraca i česti prekidi ili zastoji uzrokuju veliki trošak energije. Ovakvi se batovi klasificiraju pod batove niskog stupnja iskoristivosti, ali zbog odvojenosti temelja za nakovanj i bat postiže se smanjenje vibracija. Koristimo ih kod slobodnog kovanja i kod kovanja u ukovnjima. Tlak predgrijane pare iznosi 6 – 7 MPa [5, 12]. Prikaz takvog jednog parnog bata vidimo na slici 8.



Slika 8. Parni bat [13]

### 2.2.1.2. Preše

Preše su alatni strojevi za oblikovanje ili rezanje materijala. Odlikuje ih mirniji rad od batova. Za neke materijale nije povoljno da se opterećuju uz nagle promjene, odnosno za udarce maljem, pa ih je potrebno kovati postepeno koristeći kovačke preše. Izrađuju se u rasponu od malih ručnih do velikih industrijskih postrojenja. Prema [6] kovačke preše dijele se na:

- a) hidraulične,
- b) tarne i
- c) koljenaste.

#### a) hidraulične preše

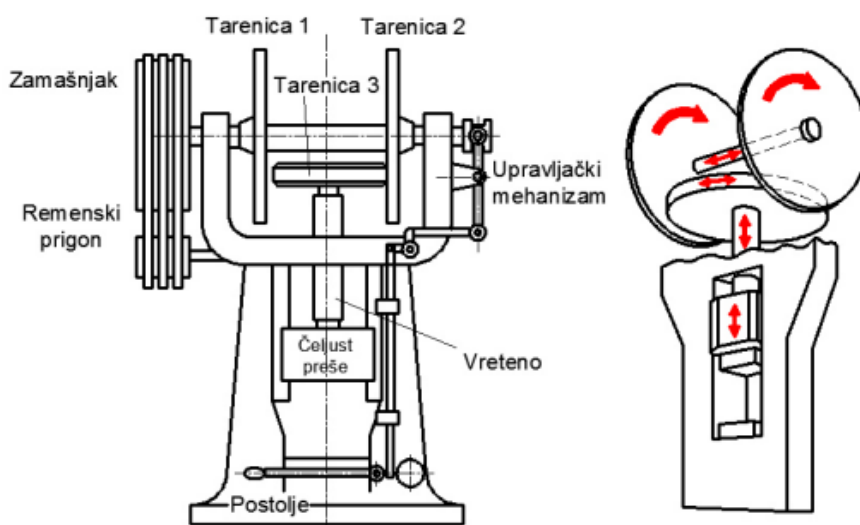
Hidraulične preše općenito služe za slobodno kovanje velikih i teških otkivaka kako bi se izbjegli veliki i teški batovi koji udarcem utječu na okolinu. Koriste se i za slobodno kovanje i za kovanje u ukovnju. Kod kovanja u ukovnju koriste se prvenstveno za kovanje dubokih šupljih otkivaka čahurastog oblika, cijevnih razvodnika i sličnih proizvoda. Hidraulične preše su vrlo jaki strojevi kod kojih se umnožavanjem broja cilindara može postići jako velika sila. Najveća sila, preša konstruiranih do sada, je 1000 MN. Pritisak tlačnog medija u sustavu je najčešće 180 bar, u iznimnim slučajevima do 240 bar, ali više od toga se ne primjenjuje zbog problema brtvljenja [12,13]. Na slici 9 prikazana je hidraulična preša.



Slika 9. Hidraulična preša [14]

**b) tarne preše**

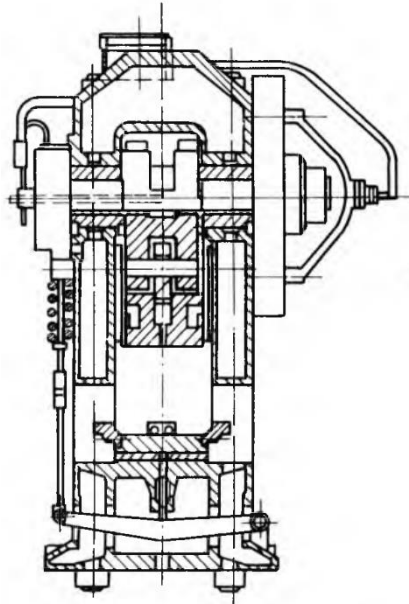
Tarne ili frikcijske preše ubrajaju se u skupinu vretenastih preša. Po principu rada nalaze se između kovačkih batova i koljenastih preša. Na tarnim prešama primjenjuje se udarno djelovanje, ali znatno manje nego na batovima. Veza sa koljenastim prešama je u tome što koriste isti princip pritiskanja pomoću žiga samo što je žig manjih dimenzija. Najčešći tip tarne preše prikazan je na slici 4. Sastoji se od dvije vertikalne i jedne horizontalne tarenice. Vertikalne tarenice se pokreću elektromotorom i pomiču se lijevo – desno te tako dolaze u kontakt s horizontalnom tarenicom koja pokreće trapezno vreteno koje je vezano za čeljust (malj) preše. Na ovakvim prešama mogu se kovati svi otkivci koji se kuju i na batovima, ali zbog malog broja udara (20-30 u minuti) koriste se samo za otkivke koji se kuju u jednom udarcu [5,13]. Na slici 10 prikazan je primjer tarne preše.



Slika 10. Tarna preša [13]

### c) koljenaste preše

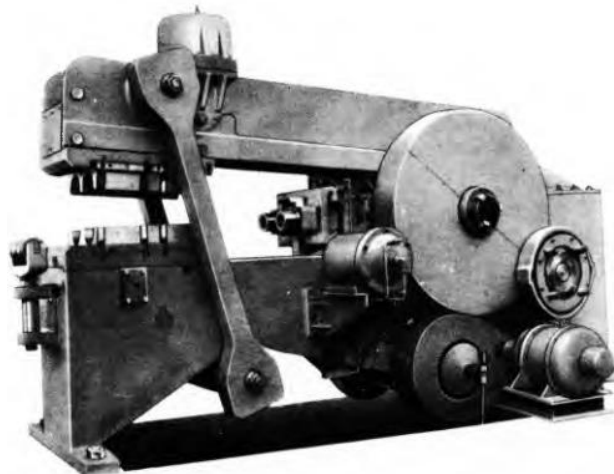
Koljenaste preše koriste se u masovnoj proizvodnji složenih otkivaka u ukovnju. Često se koriste umjesto batova jer nema posljedica udara na okolinu. Gibanje se s elektromotora prenosi preko reduktora i spojke na koljenastu osovinu koja ima jedno ili dva koljena. Na koljeno je spojena klipnjača koja se giba oscilacijski i pretvara rotacijsko gibanje koljena u translacijsko gibanje klizača u vodilicama preše. Obradak se preša pomoću bata koji je postavljen na klizač. Broj hodova bata ograničen je na 35 do 90 u minuti. Pogodne su za kovanje vrlo širokog asortimana otkivaka, ali su strojevi skuplji nego batovi. Na slici 11 prikazan je primjer koljenaste preše.



Slika 11. Koljenasta preša [2]

#### 2.2.1.3. *Horizontalni kovački strojevi*

Horizontalni kovački strojevi služe za kovanje sitnijih dijelova u motornoj industriji (svornjaci, motke i ventili) i za kovanje dijelova gdje je polazni materijal u obliku šipke. Žigovi za pojedina preoblikovanja upeti su u horizontalno pokretanom nosaču, a poseban mehanizam povezan sa gibanjem žigova zatvara i otvara alat te omogućuje ručno premještanje u različite gravure [2]. Na slici 12 prikazan je primjer jednog horizontalnog kovačkog stroja.



Slika 12. Horizontalni kovački stroj [2]

## 2.2.2. Postupci slobodnog kovanja

Slobodno kovanje je najstariji postupak oblikovanja metala plastičnom deformacijom pri čemu se djelovanjem tlačne sile između dvije paralelne površine (bata i nakovnja ili pritiskivača i stola preše) ostvaruje redukcija visine uložka. Pošto se proces provodi bez korištenja kalupa pritom je omogućeno slobodno bočno širenje metala, dok se uložak postupno deformira do željenog oblika gotovog proizvoda [9].

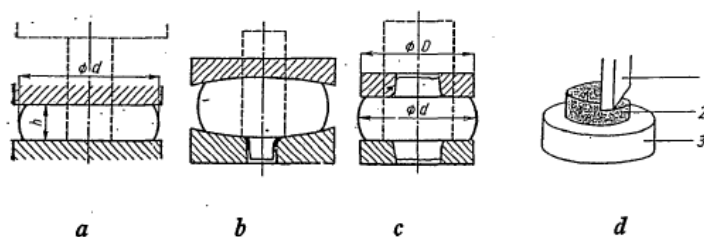
Najvažniji postupci slobodnog kovanja su sabijanje radi smanjenja visine sirovca te raskivanje i iskivanje radi smanjenja njegovog poprečnog presjeka, promjene debljine ili povećanje promjera i stanjenja stijenke kod kovanja prstena te probijanje otvora. Ovi se postupci uvijek koriste kod izrade otkivaka slobodnim kovanjem. Kako pomoćne postupke možemo smatrati zasijecanje koje obično prethodi iskivanju, produživanje, proširivanje, savijanje, ravnanje, zaglađivanje i odsijecanje. Osnovne i pomoćne postupke koristimo za otkovke malih masa, kako i većih. U praksi otkovak se izrađuje primjenom i kombinacijom ovih postupaka [6].

Glavne kovačke operacije bit će prezentirane u narednim poglavljima [9, 15-17].

### 2.2.2.1. Sabijanje

Djelovanjem aksijalne deformacijske sile na sirovac smanjuje se visina, a povećava poprečni presjek. U radialnom smjeru nastupa slobodno tečenje materijala, ne nastupa promjena volumena deformiranog materijala, ali je neizbježna pojava bačvanja koja nastaje pod djelovanjem trenja na površini dodira alata i deformiranog materijala. Zbog kontaktnog trenja slojevi materijala sirovca uz kontaktne površine otežano teku u odnosu na slojeve koji su dovoljno udaljeni od kontaktnih površina te se jasno mogu uočiti konture bačve. Pojava bačvanja je znak postojanja ne ravnomjerne deformacije, s tim i neravnomjernog učinka deformacijskog sabijanja na strukturu i svojstva materijala [16].

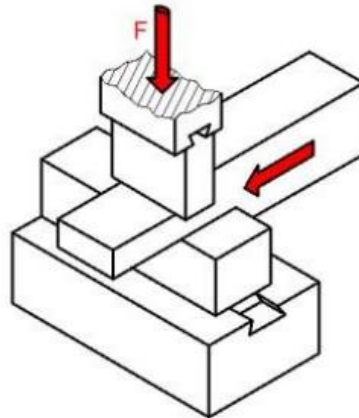
Na slici 13 je prikaz postupka sabijanja različitih oblika tlačnih ploha kod slobodnog kovanja. Slučaj a prikazuje sabijanje ravnim plohama malja i nakovnja koji se izvodi batovima i kovačkim hidrauličkim prešama. U slučaju b sabija se pomoću zakrivljenih tlačnih ploha. Slučaj c prikazuje sabijanje između dva izdanka i djelomično sabijanje sirovca prikazano na slučaju d [16].



Slika 13. Prikaz postupka sabijanja sirovca [16]

### 2.2.2.2. Iskivanje i raskivanje

Iskivanje i raskivanje se sastoji od toga da se kovani komad stanji, produži, iskuje ili raširi. Kovani komad se istovremeno rasteže u dužinu i širinu te je zbog toga važno da se kovani komad stalno okreće za 90°. Ako je površina kojom se kuje manja rastezanje je veće, a raširivanje je manje. Ušicom se kuje kada želimo da se materijal što više produži, a što manje proširi. Na slici 14 dan je prikaz iskivanja [9].

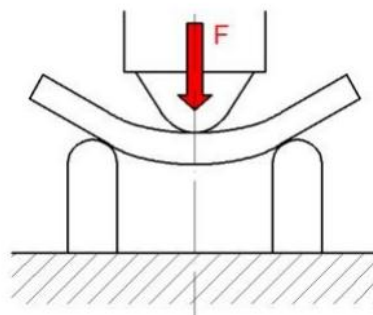


Slika 14. Prikaz iskivanja [15]

Kod kovanja strojem koristi se posebno sedlo kojim sprječavamo prejako raširivanje komada. Kose se površine iskidaju stepenasto kao što je prikazano na slici 36. Kada bismo htjeli kosini iskidati da budu ravne koristi se poseban komad koji se podmete između kovanog komada i malja da se stvori jaki postrani pritisak. Najčešće se iskida samo jedan dio komada, koji se potom zagladi. Oštar kut prijelaza radimo posebnim čekićem. Kod iskivanja većih komada mehaničkim čekićem zasiječe se mjesto posebnim alatom tupih oštrica [8].

### 2.2.2.3. Savijanje

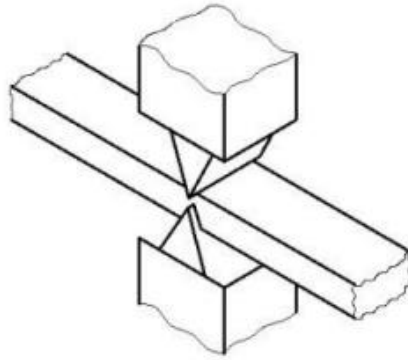
Savijanje je postupak pri kojemu se kod slobodnog kovanja uložak savija prema zadanoj konturi (slika 15). Ova operacija koristi se pri izradi otkivaka koji imaju određeni nagib kao što su kuke, spojnice i sl. Pri savijanju u unutarnjim slojevima dolazi do tlačnih naprezanja, dok su vanjski vlačno opterećeni, uslijed čega je moguća pojava nabora i/ili pukotina na savijanom poluproizvodu ili proizvodu. Kako bi se to izbjeglo, potrebno je savijanje provoditi pod određenim promjerima i kutovima, kao i povećati presjek u zoni savijanja [9].



Slika 15. Prikaz savijanja [15]

### 2.2.2.4. Odsijecanje

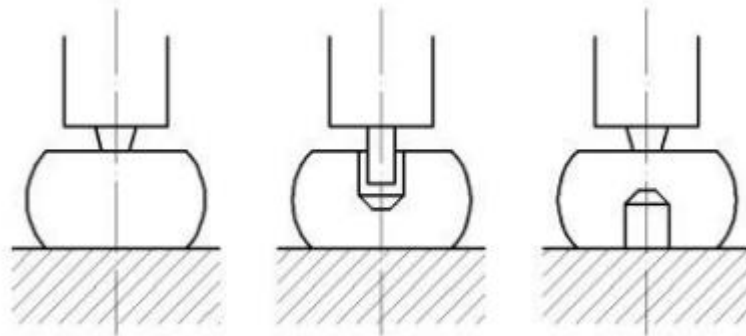
Odsijecanje je tehnološka operacija odvajanja jednog dijela otkivka od drugog u cilju postizanja zadanih dimenzija. Djelovanjem bata ili preše na alat dolazi do odsijecanja (slika 16). Pritom se koriste posebni alati koji se stavljaju na otkivak na mjesto gdje će se odsijecati. Ovom operacijom odvaja se višak materijala, reže uložak prije kovanja manjih proizvoda, odstranjuje glava ili peta otkivka i dr. [9].



Slika 16. Prikaz odsijecanja [15]

#### 2.2.2.5. Probijanje

Probijanje je operacija izrade otvora na otkivku. Probijanje se provodi prvo na čašu (slika 17). Pritom se može vršiti s donje ili gornje strane. Prvo se utisne trn pomoću preše i dobiva se čaša, nakon čega se uložak stavlja na poseban alat gdje se probije dno čaše i napravi otvor na otkivku. Ova faza je neophodna kod izrade prstena ili cjevastih oblika slobodnim kovanjem [9].



Slika 17. Prikaz probijanja [15]

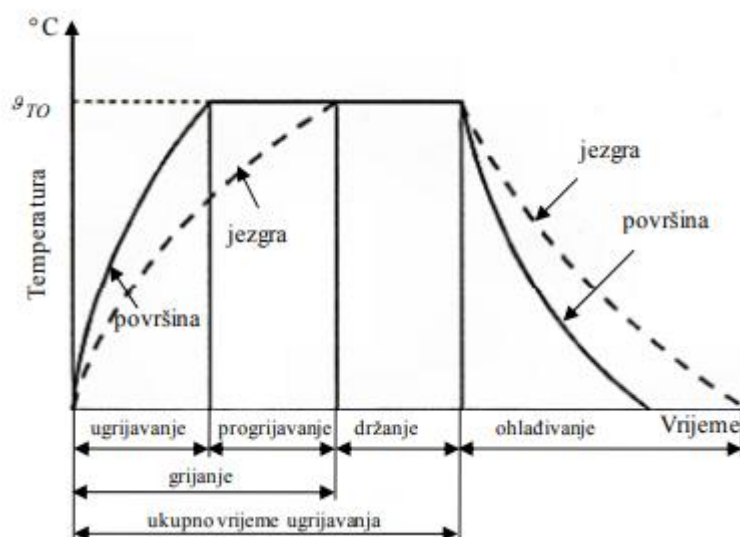
### 2.3. Toplinska obrada

Mehanička svojstva metalnih materijala kao što su vlačna čvrstoća, tvrdoća, žilavost i plastičnost mogu se poboljšati promjenom kemijskog sastava, ali i promjenom strukture i stvaranjem novih faza tijekom procesa toplinske obrade. Toplinska obrada je proces pri kojem se metalni obratci izlažu zagrijavanju do temperatura austenitizacije, zadržavaju na tim temperaturama određeno vrijeme i hlade, kako bi se promijenila postojeća mikrostruktura i postigla i poboljšala željena svojstva (fizička, kemijska, mehanička) [18].

Postupcima toplinske obrade događaju se različite pretvorbe, nastaju nove mikrostrukture koje utječu na mehanička svojstva materijala, kao što su čvrstoća, tvrdoća, žilavost i plastičnost. Koja će mikrostruktura nastati i u kojoj mjeri ovisi o postupku toplinske obrade čelika koji se primjenjuje, njegovom kemijskom sastavu, postojećoj mikrostrukтури, stupnju hladne deformacije te brzinama zagrijavanja i hlađenja prilikom postupka toplinske obrade.



Postupak svake toplinske obrade može se prikazati dijagramom ovisnosti promjene temperature i vremena. Takav opći dijagram prikazan je na slici 18. Zaključuje se da postoje faze uslijed kojih se događaju promjene strukture. Vidimo da u fazi zagrijavanja dolazi do temperaturne razlike između površine predmeta i njegove unutrašnjosti tj. jezgre. Što je veća brzina zagrijavanja veća je razlika u temperaturama, a veća masa zagrijanog predmeta smanjuje koeficijent toplinske vodljivosti.



Slika 18. Dijagram postupka toplinske obrade [19]

Svaka faza toplinske obrade važna je za uspješno provođenje kompletnog postupka i za dobivanje željenog rezultata. Faza hlađenja će biti sporija, što je masa grijanog predmeta veća i što je veći intenzitet temperaturne promjene.

Glavna obilježja toplinske obrade su [20]:

- temperatura zagrijavanja (progrijavanja),
- brzina zagrijavanja (progrijavanja) i hlađenja.

Prema dubini do koje dopire utjecaj toplinske obrade razlikujemo [20]:

- 1) toplinska obrada samo površine - (brojni elementi strojeva imaju posebne zahtjeve koji se odnose samo na posebna svojstva njihovih površina (zupčanici, cilindri) motora, rukavci u ležajevima su elementi od kojih se traži veća tvrdoća za bolju otpornost površine na trošenje),
- 2) toplinska obrada cijelog presjeka - za one strojne elemente kod kojih se očekuju, od jezgrenog sloja čeličnog obratka, točno određena svojstva (npr. povećana tvrdoća).

Prilikom oba postupka toplinske obrade postići će se promjena mikrostrukture čeličnog obratka (samo površine ili cijelog presjeka obratka).

Postupci toplinskih obrada čelika dijele se na postupke toplinske obrade udaljavanjem od ravnotežnog stanja u koje ulaze kaljenje i površinsko kaljenje čelika, postupci toplinskih obrada vraćanjem u ravnotežno stanje među kojima razlikujemo žarenje, popuštanje i poboljšavanje te kemijsko-difuzijske procese toplinske obrade u koje pripadaju nitriranje, cementiranje, karbonitriranje [20].

Najčešći cilj toplinske obrade čelika ne uključuje samo dobivanje ravnotežnih faza. Neravnotežne faze povećati će čvrstoću i tvrdoću čelika, a ponekad i kombinaciju čvrstoće i žilavosti. Metastabilni dijagram ne može dati prikaz u neravnotežne faze koje nastaju bržim hlađenjem. Prilikom faze projektiranja postupka toplinske obrade koristi se i metastabilni dijagram za procjenu pravilne temperature austenitizacije.

### **2.3.1. Kaljenje**

Osim kaljenja cijelog radnog dijela, često se u praksi primjenjuje i postupak lokalnog (površinskog) kaljenja. Takvim postupkom ugrijavaju se samo neki dijelovi tvorevina koje kaljenjem treba otvrdnuti.

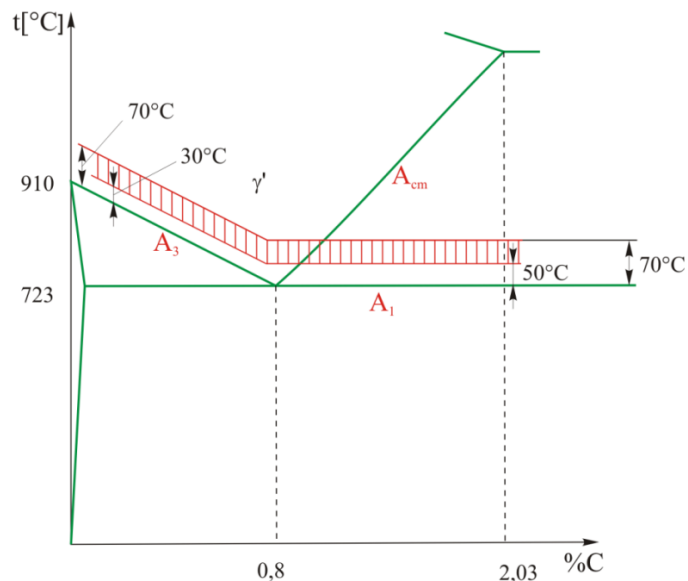
Kako bi se postiglo kaljenje čelika moraju biti zadovoljene sljedeće temeljne pretpostavke:

- modifikacija rešetke željeza pri grijanju i hlađenju:  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ ,
- povećanje rastvorivosti ugljika u rešetki željeza na povišenoj temperaturi (u austenitu, tj.  $\gamma$  - Fe),
- sposobnost austenita da ubrzanim hlađenjem zadrži rastvoreni ugljik u čvrstoj otopini sve do temperature  $M_s$  (tj. do temperature početka pretvorbe, tj. alotropske modifikacije austenita u martenzit).

Za kaljenje čelika moraju biti ispunjeni određeni uvjeti, od kojih su najvažniji transformacija ferita u austenit i dovoljno visok sadržaj ugljika u čeliku. Čelik treba zagrijati u austenitno područje kako bi hlađenjem došlo do nastajanja martenzita, brzina hlađenja mora biti dovoljno velika kako bi se izbjegla difuzija atoma ugljika iz rešetke austenita kako bi se konačno atomi ugljika mogli zadržati u martenzitnoj rešetci.

Postupak kaljenja čelika može se podijeliti u dvije faze [21]:

1. Zagrijavanje na pravilnu temperaturu austenitizacije te progrijavanje (zadržavanje na temperaturi austenitizacije dok se ne izjednače temperature površine i jezgre te dok se struktura ne homogenizira, tj. izjednači koncentracija ugljika u svim dijelovima volumena austenita) što vidimo na slici 19.
  - za podeutektoidne čelike:  $t_A = A_3 + (30 \div 70) [^{\circ}\text{C}]$
  - za nadeutektoidne čelike:  $t_A = A_1 + (50 \div 70) [^{\circ}\text{C}]$ .
2. Gašenje u vodi (hlađenje nadkritičnom brzinom).



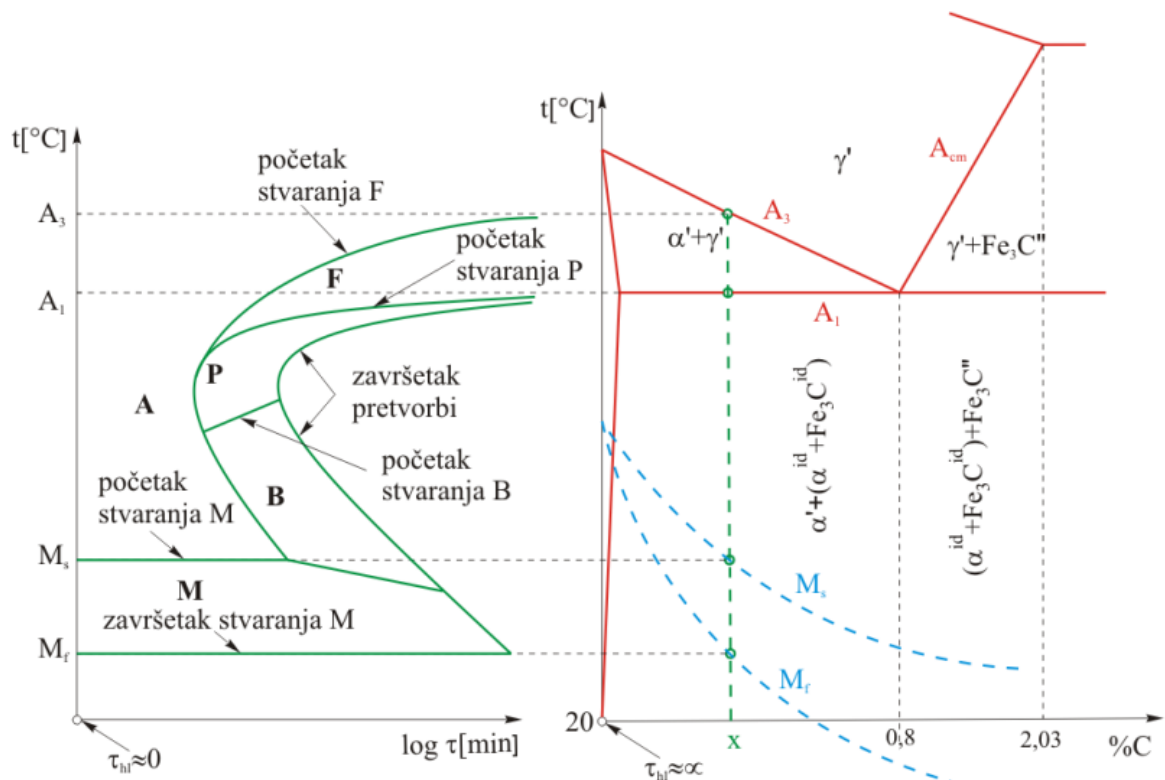
Slika 19. Područje optimalnih temperatura austenitizacije za kaljenje ugljičnih čelika [21]

Kako je u praksi brzina hlađenja uglavnom veća od metastabilne, nastale faze bitno su različite od onih koje se nalaze u metastabilnom dijagramu. Pri jako malim brzinama hlađenja nastaju metastabilne faze (ferit, lamelarni perlit i sekundarni cementit), dok pri vrlo velikim brzinama hlađenja nastaje martenzit uz nešto nepretvorenog austenita. Faze koje nastaju između tih dviju ekstremnih brzina hlađenja jesu smjesa cementita i ferita i to sve finije strukture što je brzina hlađenja veća. Kako bi se moglo točno odrediti fazni sastav i količinske udjele koji nastaju ubrzanim hlađenjem, promjene faza i temperatura u dijagramu moraju biti prikazane kao vremenska funkcija [21].

TTT dijagram za čelik koristi se za razumijevanje transformacije čelika. On objašnjava područje transformacije martenzita, prikazuje kakvu važnost ima brzina hlađenja, zadržavanje austenita u mikrostrukтури i stvaranje bainita u čeliku. TTT dijagram prikazuje odnose vremena, transformacije u čeliku i odnose temperatura. Razlikujemo više dijagrama od čega Uptonov vrijedi za ohlađivanje pri vrlo velikim brzinama dok se za veoma dugo vrijeme ohlađivanja koristi Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram. Pomoću TTT dijagrama prikazuje se i dinamika faznih pretvorbi čelika pri ohlađivanju iz austenitnog područja. Raspad austenita ostvaruje se pri izotermičkim uvjetima gdje je temperatura tokom vremena promjene austenita u neke sekundarne faze konstantna ili pri kontinuiranim uvjetima gdje tijekom vremena promjene austenita u sekundarne faze temperatura stalno pada.

Pomoću tih dijagrama moguće je odrediti količinu pretvorenog austenita A u funkciji vremena i temperature hlađenja te vrste i količine nastalih faza. TTT-dijagrami koriste se i za određivanje načina hlađenja s ciljem postizanja odgovarajuće strukture i faznog sastava (svojstava čelika).

Između dva ekstremna slučaja (tj. između  $\tau_{hl} \rightarrow 0$  i  $\tau_{hl} \rightarrow \infty$ ) dobiva se kvalitativna slika za određeni udio ugljika (x % C) što možemo vidjeti na slici 20.



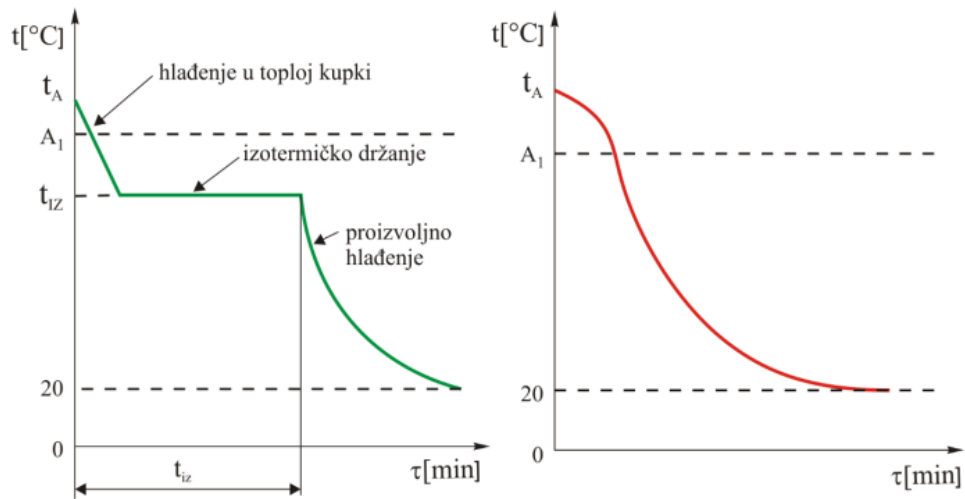
Slika 20. TTT–dijagram (zeleni) konstruiran pomoću metastabilnog Fe-Fe<sub>3</sub>C (crveni) i Uptonova (plavi) dijagrama za podeutektoidni čelik [21]

Prilikom konstruiranja TTT–dijagrama, zbog boljeg pregleda, treba ucrtati u jednom te istom dijagramu i metastabilni Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagram i Uptonov dijagram (Slika 19 desno). Linije  $A_1$ ,  $A_3$  i  $A_{cm}$  u Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagramu vrijede samo za grijanje i jako sporo hlađenje (hlađenje u ugašenoj peći). Nasuprot tome linije  $M_s$  i  $M_f$  u Uptonovu dijagramu vrijede samo za jako brzo hlađenje (npr. hlađenje u hladnoj vodi).

### 2.3.2. Načini hlađenja austenita

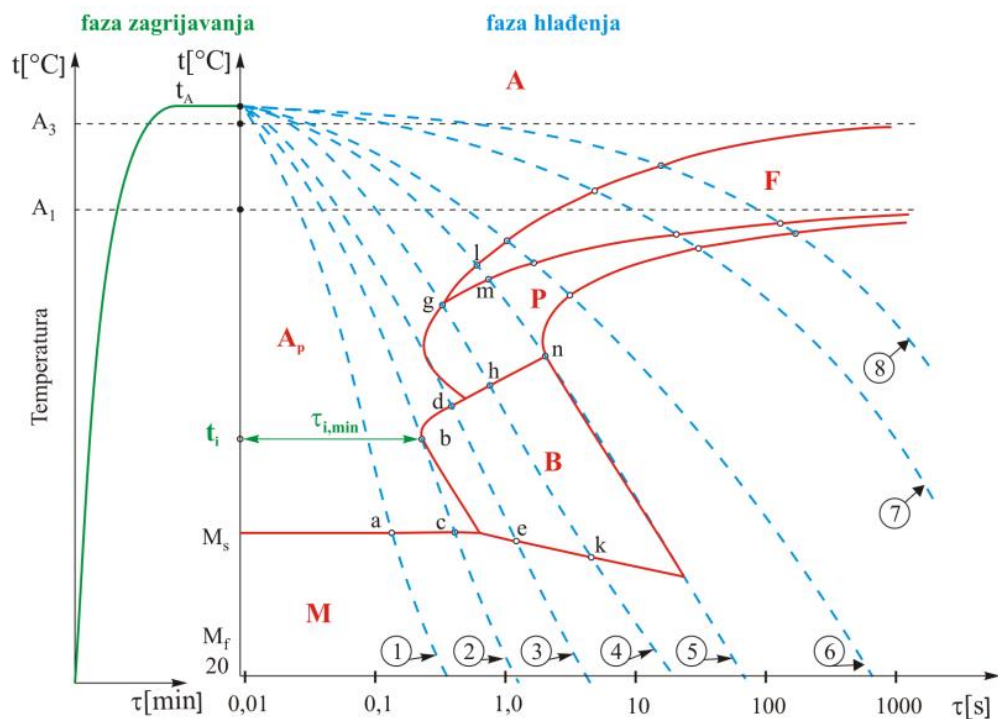
Hlađenje austenita, koje se prati TTT-dijagramima, može se obaviti na dva načina:

1. Diskontinuirano ili izotermički – hlađenje se obavlja do određene temperature (iznad sobne) i zadržava na toj temperaturi do potpunog ili djelomičnog završetka pretvorbe austenita (npr. hlađenje austenitiziranog uzorka u solnoj kupki zagrijanoj na 500 $^{\circ}\text{C}$ ). Pretvorba austenita odvija se pri jednoj konstantnoj temperaturi (slika 21 lijevo).
2. Kontinuirano ili anizotermički – hlađenje se obavlja kontinuirano s temperature austenitizacije do sobne temperature (npr. hlađenje austenitiziranog uzorka na mirujućem zraku sobne temperature). Pretvorba austenita odvija se u temperaturnom intervalu (slika 21 desno).



Slika 21. Krivulja hlađenja za izotermičko (lijevo) i kontinuirano (desno) hlađenje [21]

Različitim brzinama hlađenja iz područja potpune austenitizacije do sobne temperature dešavaju se promjene u mikrostrukтури. Krivulje kontinuiranog hlađenja od 1 do 8 prikazane su na slici 22 za jedan austenitizirani podeutektoidni ugljični čelik u pripadnom TTT dijagramu.



Slika 22. Prikaz kontinuiranog ohlađivanja jednog austenitiziranog podeutektoidnog ugljičnog čelika u pripadnom TTT-dijagramu [21]

## 2.4. Mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu

Ispitivanje tvrdoće je najraširenija nerazorna metoda ispitivanja materijala koja omogućava brzo, lako i jednostavno određivanje važnog mehaničkog svojstva. Tvrdoća je mehaničko svojstvo materijala koje predstavlja njegovu otpornost prema prodiranju drugog, tvrdog materijala u njegovu površinu ili strukturu. Na tvrdoću utječe kemijski sastav materijala, mehanička i toplinska obrada te je ona usko povezana s granicom elastičnosti, modulom elastičnosti, granicom razvlačenja, vlačnom čvrstoćom i žilavosti [22].

Prvu metodu mjerenja tvrdoće razvio je njemački mineralog Friedrich Mohs 1822.g., koji je uspostavio ljestvicu tvrdoće na usporedbi deset relativno čestih minerala. Napravljena je podjela prema Mohsovoj ljestvici minerala u 10 razreda na način da svaki sljedeći član ove ljestvice mora zaparati površinu prethodnog člana.

Za mjerenje tvrdoće tehničkih materijala u 20. stoljeću razvijen je niz metoda ispitivanja tvrdoće; Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop i drugi. Za inženjersku praksu važno je znati da je tvrdoća u odnosu s nekim drugim svojstvima materijala, npr. s vlačnom čvrstoćom kod nekih čelika i ljevova, s otpornošću na abrazijsko trošenje. Za ispitivanje tvrdoće važno je izvršiti odgovarajuću pripremu mjernih ploha kako bi se mogla točno izmjeriti veličina, dubina otiska ili visina odskoka utiskivača.

Najveću primjenu u praksi imaju statičke metode ispitivanja tvrdoće koje su standardizirane širom svijeta: Brinellova, Rockwellova i Vickersova kod kojih se ispitivanje tvrdoće izvodi statičkim djelovanjem sile na statičkim uređajima u laboratorijima za kontrolu kvaliteta, osobito poslije toplinskih obrada, kemijsko-toplinskih obrada, razvoja novih materijala i proizvoda ili poslije izvršenih tehnoloških obrada. Nešto manju upotrebu imaju metode ispitivanja tvrdoće koje pretežno nisu normirane i kod kojih se ide na teren u pogone s malim prijenosnim uređajima s dinamičkim djelovanjem sile (udarnim).

Metoda ispitivanja tvrdoće po Vickersu može se smatrati univerzalnom. Ova je metoda nastala oko 25 godina nakon Brinellove metode. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće primjenjuje se za sve vrste metalnih materijala pomoću tvrdomjera prikazanog na slici 23 i ima jednu od najširih skala među testovima tvrdoće. Što je veći trag koji ostavlja udubljenje na površini materijala pri definiranoj ispitnoj sili, to je materijal koji se testira mekši [23, 24].

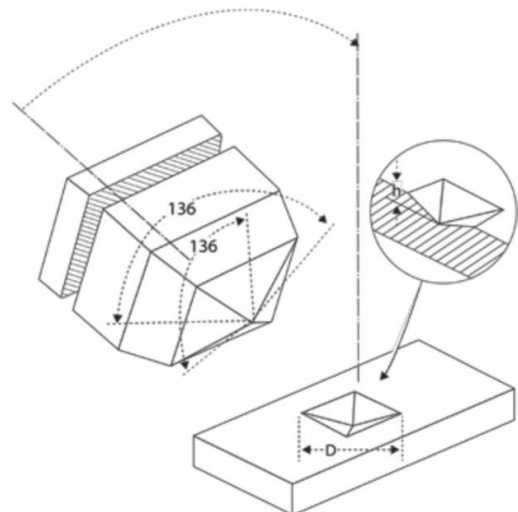


Slika 23. Tvrdomjer i njegove komponente [25]

Metoda mjerenja tvrdoće po Vickersu kao indentor/utiskivač upotrebljava najtvrdi materijal, dijamant koji tvori četverostranu piramidu s vršnim kutem između stranica od  $136^\circ$  koja na površini uzorka ostavlja kvadratni otisak. Vickersov dijamantni stožac s vršnim kutom prikazan je na slici 24a, a shema geometrije indentora na slici 24b [22].



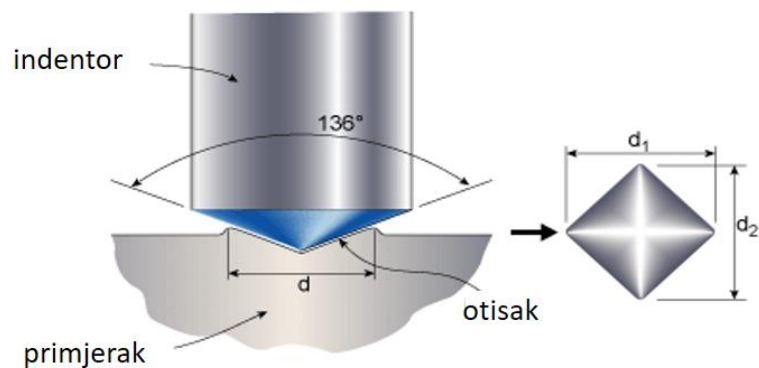
a)



b)

Slika 24. a) Vickers-ov dijamantni stožac s vršnim kutom od  $136^\circ$  b) shema geometrije indentora [26]

Utiskivač (prikazan na slici 24), s vršnim kutem nasuprotnih stranica od  $136^\circ$  mora biti dobro poliran i na njegovoj površini ne smije biti grešaka ili napuknuća. Površina uzorka koji se ispituje treba biti ravna i glatka što se najbolje može pripremiti brušenjem i poliranjem. U glatku površinu utiskuje se dijamantni stožac koji ostavlja udubljeni kvadratni otisak u materijalu. Tom otisku potrebno je pomoću mikroskopa koji se nalazi na tvrdomjeru izmjeriti obje dijagonale. Dijagonale koje se mjere prikazane su na slici 25.



Slika 25. Utiskivanje indentora [27]

Vickersova tvrdoća HV računa se iz sile pritiska  $F$  (N) i površine utisnutog plašta piramide  $A$  ( $\text{mm}^2$ ), koju određujemo mjerenjem dijagonala  $d_1$  i  $d_2$  (mm). Dijagonale  $d_1$  i  $d_2$  mjerimo točnošću od  $\pm 0,001$  mm. Debljina ispitnog uzorka mora iznositi najmanje  $1,5 d$ . Prema pravilu upotrebljavaju se sljedeće sile pritiska  $F$ , prikazane u tablici 1, koje su raspoređene po zaokruženim vrijednostima  $0,102 F$ , dodajući ih (za prikaz upotrijebljene sile pritiska) oznaci tvrdoće po Vickersu HV [28].

Tablica 1. Primijenjena sila i potrebna oznaka uz izmjerenu tvrdoću metodom po Vickersu [28]

|           |       |       |       |       |       |        |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $F$ / N   | 49,03 | 98,07 | 196,1 | 294,2 | 490,3 | 980,7  |
| $0,102 F$ | 5     | 10    | 20    | 30    | 50    | 100    |
| HV        | HV 5  | HV 10 | HV 20 | HV 30 | HV 50 | HV 100 |

Prema definiciji, tvrdoća po Vickersu jednaka je omjeru sile i površine utisnuća što ga ostavlja piramida prema izrazom [25]:

$$HV = k \cdot \frac{F}{S}$$

gdje  $F$  predstavlja silu utiskivanja u N,  $S$  površinu otiska na površinu nakon rasterećenja u  $\text{mm}^2$ , a  $k$  predstavlja konstantu koja je recipročna vrijednost ubrzanja zemljine sile teže ( $g_n$ ) prema:

$$k = \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9.80665} \approx 0.102$$

Stoga Vickersovu tvrdoću opisuje sljedeća jednadžba:

$$HV = \frac{0.102 \cdot F}{S}$$

Površina otiska izražava se pomoću dijagonale baze otisnuća (kvadrata), pa tako matematički izraz za izračun Vickersove tvrdoće izražava se u sljedećem obliku:



$$HV = 0.102 \cdot \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

gdje  $d$  predstavlja srednju vrijednost dvije izmjerene dijagonale otiska.

Broj koji se dobije mjerenjem tvrdoće po Vickersu je bezdimenzionalna veličina, a uz iznos tvrdoće navodi se i sila opterećivanja, kao što je npr. 430 HV10. To znači da je izmjerena tvrdoća iznosila 430 HV, a da je dobivena utiskivanjem indentora silom od  $(10 \cdot 9.81)$  N. Metoda po Vickersu ima prednost pred ostalim metodama određivanja tvrdoće zbog širokog raspona primijenjenih sila te zbog toga što nastali otisak ne oštećuje uzorak funkcionalno [13].

## 2.5. Opći odnos između čvrstoće i tvrdoće

Tvrdoća je jedno od najkarakterističnijih svojstava materijala i često igra ključnu ulogu u napretku civilizacije jer je omogućila konstruiranje sve sofisticiranijih uređaja i strojeva. Uz tvrdoću i čvrstoća je također važno svojstvo materijala. Odnosi između čvrstoće i tvrdoće su prilično različiti za materijale s grubozrnatom i sitnozrnatom strukturom. Oni se često pokoravaju trostrukom empirijskom odnosu u metalima.

U radu [29] napravljen je pregled ovisnosti čvrstoće i tvrdoća, gdje je navedeno da se tvrdoća HV iskazana u MPa za ugljične i legirane čelike može dobiti sljedećim izrazom:

$$HV \approx 3 \cdot R_m$$

gdje je  $R_m$  vlačna čvrstoća.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada, slobodno su kovani trakasti uzorci konstrukcijskog čelika na stroju za kovanje s različitim brojem udaraca bata od: 2, 5, 10 i 20. Svakom sabijenom uzorku izračunat je relativni stupanj deformacije na osnovu njegovih početnih i deformiranih izmjera debljine trake. Sabijeni trakasti uzorci kovanjem najprije su razrezani tračnom i kružnom pilom, zatim prešani u vodljivu masu, brušeni, polirani te nagriženi nitalom kako bi se provela metalografska analiza mikrostrukture pomoću invertnog svjetlosnog mikroskopa. Uzorcima se zatim pomoću tvrdomjera izmjerila tvrdoća metodom po Vickersu na određenim mjestima uzdužnog presjeka. Dio izrezanih deformiranih uzoraka podvrgnut je toplinskoj obradi i naknadnoj provedbi cijele procedure pripreme kako bi se ponovno napravila metalografska analiza i mjerenje tvrdoće. U radu su analizirane izmjerene vrijednosti tvrdoće o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju. Ovisnosti su aproksimirane određenim krivuljama uz prikaz statističkih parametara. Evidentno je povećanje tvrdoće s relativnim stupnjem sabijanja što se i iz metalografskih snimki mikrostrukture može potvrditi.

#### 3.1. Konstrukcijski čelik

Materijal na kojem je proveden eksperiment kovanja u ovom radu je konstrukcijski čelik, S275JR+AR (Č.0451) prema evropskoj normi EN 10025-2, kemijskog je sastava prikazanog u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika S275JR+AR (Č.0451) u mas.% prema EN 10025-2

|       |       |       |       |       |       |       |         |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cu    | Cr    | Ni      |
| 0,127 | 0,175 | 0,593 | 0,013 | 0,006 | 0,369 | 0,103 | 0,164   |
| Sn    | Al    | Mo    | Nb    | V     | B     | Ti    | N (ppm) |
| 0,015 | 0,010 | 0,045 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 112     |

Čelik S275JR+AR se često koristi u građevinskim projektima, strojarstvu i drugim industrijama gdje su potrebni čelici s određenim mehaničkim svojstvima i izdržljivošću. Njegova oznaka S275JR: "S" označava konstrukcijski (strukturalni) čelik, dok "275" označava minimalnu granicu elastičnosti (čvrstoću) čelika izraženu u MPa. Drugi dio njegove oznake +AR: "AR" označava da se radi o čeliku koji je termomehanički valjan (engl. "As Rolled"), što znači da je oblikovan na visokim temperaturama i nije podvrgnut dodatnoj termičkoj obradi nakon valjanja.

Materijal za potrebe ovog diplomskog rada nabavljen je u traci koja je toplo valjana od nelegiranog konstrukcijskog čelika. Traka dimenzija 60×8 mm odrezana je na duljinu od 700 mm.

### 3.2. Eksperiment kovanja

Iz trake širine 60 mm i debljine 8 mm konstrukcijskog čelika S275JR za potrebe ovog eksperimenta izrezane su dvije trake svaka duljine 700 mm. Na svakoj traci označena su po dva mjesta na kojima će se provesti kovanje batom s različitim brojem udaraca. Na prvoj traci na prvom mjestu 2 udaraca, a na drugom mjestu 5 udaraca. Na drugoj traci na prvom mjestu 10 udaraca, a na drugom mjestu 20 udaraca.

Obje trake podvrgnute su planiranom mjestimičnom kovanju na kovačkom stroju. Svako mjesto kovanja imalo je različit broj udaraca batom. Eksperiment je proveden u svrhu praćenja utjecaja relativnog stupnja deformacije na tvrdoću sabijenog materijala. Kovanje je provedeno na starijem mehaničkom kovačkom stroju koji je prikazan na slici 26, a sam proces kovanja trake prikazan je na slici 27.



Slika 26. Korišten kovački stroj (mehanički polužni perni bat)



Slika 27. Kovanje uzorka

Nakon provedenog eksperimenta kovanja poprečna udubljenja uzrokovana različitim brojem udaraca batom mogu se vidjeti na slici 28 uz oznaku broja udaraca zapisanu kredom.



Slika 28. Trakasti uzorci nakon kovanja uz oznaku broja udaraca batom

Nakon uzimanja izmjera pomičnim mjerilom visine kovanih uzoraka različitog broja udaraca pristupilo se izračunu relativnog stupnja deformacije  $\varepsilon_r$ . Relativni stupanj deformacije izračunat je za svaki kovanjem sabijeni uzorak prema jednadžbi:

$$\varepsilon_r = \frac{h_0 - h}{h_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Sve izmjerene i izračunate vrijednosti potrebne za ovaj eksperiment kovanja prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Podaci eksperimenta kovanja

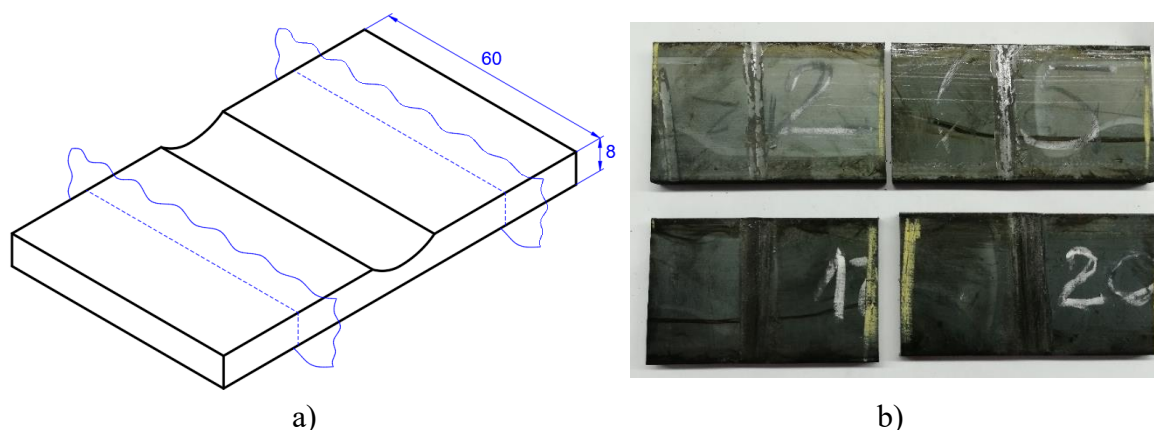
| Uzorak | Broj udaraca batom | Početna debljina trake $h_0$ , [mm] | Debljina deformiranog dijela $h$ , [mm] | Relativni stupanj deformacije (redukcije) $\varepsilon_r$ , [%] |
|--------|--------------------|-------------------------------------|---|---|
| 1      | 2                  | 8,26                                | 7,90                                    | 4,36  |
| 2      | 5                  | 8,26                                | 7,71                                    | 6,66  |
| 3      | 10                 | 8,26                                | 7,12                                    | 13,8  |
| 4      | 20                 | 8,26                                | 6,97                                    | 15,62   |

### 3.3. Rezanje uzoraka nakon kovanja

Nakon provedenog eksperimenta kovanja uzorke je bilo potrebno izrezati kako bi se jedan dio njih pripremio za metalografsku analizu, a drugi dio njih uzeo za toplinsku obradu. Trakasti uzorci najprije su se prerezali poprečno tračnom pilom u neposrednoj blizini mjesta deformiranog kovanjem, što je prikazano na slici 29. Prilikom rezanja nije bilo potrebno hlađenje. Način rezanja uzoraka poprečno prikazan je na slici 30a, gdje je plavom bojom označena ravnina rezanja tračnom pilom prije i nakon mjesta kovanja. Provedenim rezanjem dobiveni su uzorci prikazani na slici 30b.

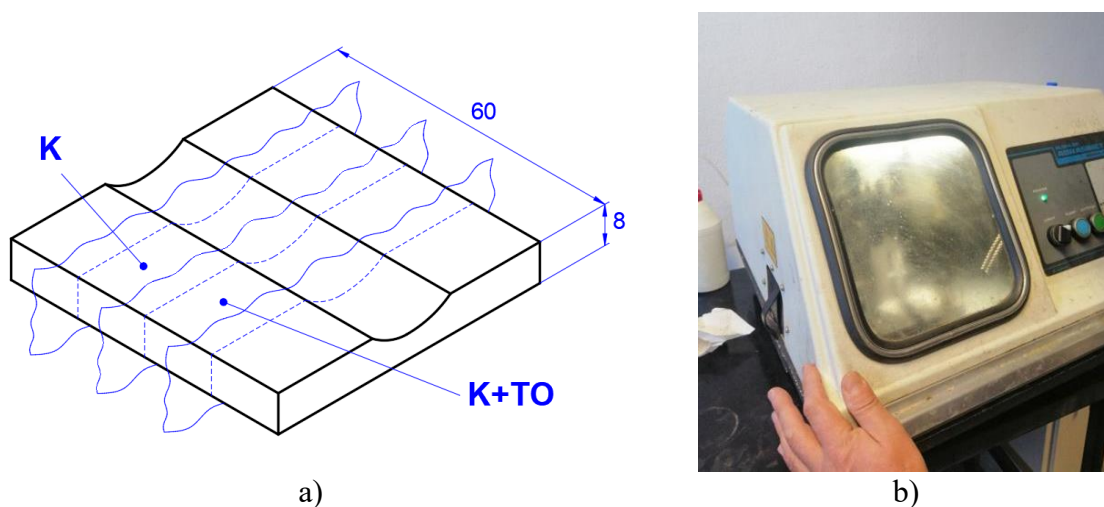


Slika 29. Rezanje uzoraka tračnom pilom



Slika 30. a) shema poprečnog rezanja uzorka, b) izrezani uzorci tračnom pilom

Nakon provedenog poprečnog rezanja deformirane dijelove na traci je bilo potrebno uzdužno presjeći (slika 31a) rezalicom Buehler ABRASIMET (slika 31b). Na slici 31a plavom bojom su označene uzdužne ravnine rezanja rezalicom okomito na liniju kovanja. Rezalica sadrži vertikalnu kružnu pilu, sustav za dovod rashladne tekućine, stege i poklopac. Manipulacija reznom pločom provodi se ručno preko drške. Iz uzorka s određenim brojem udaraca izrezana su dva središnja manja uzorka. Jedan od njih bio je naknadno toplinski obrađen, što će se prikazati u sljedećem odjeljku.



Slika 31. a) shema uzdužnog rezanja uzorka, b) rezalica Buehler ABRASIMET

Svaki se uzorak u rezalici postavlja zasebno na središnji dio točno ispod kružne ploče za rezanje kao što je prikazano na slici 32. Tijekom rezanja, uzorak i pila hlade se odgovarajućom tekućinom kako ne bi došlo do visokih temperatura uslijed djelovanja trenja te do moguće pojave iskri. Razrezani kovani uzorci označeni su prema tablici 3 od uzorka 1 do 4, što je prikazano su na slici 33. Uzorci u lijevom stupcu trebaju se pripremiti za metalografsku analizu, a uzorci u desnom stupcu su označeni zarezanim crticama jer se moraju toplinski obraditi i tek poslije toplinske obrade pripremiti za metalografsku analizu.





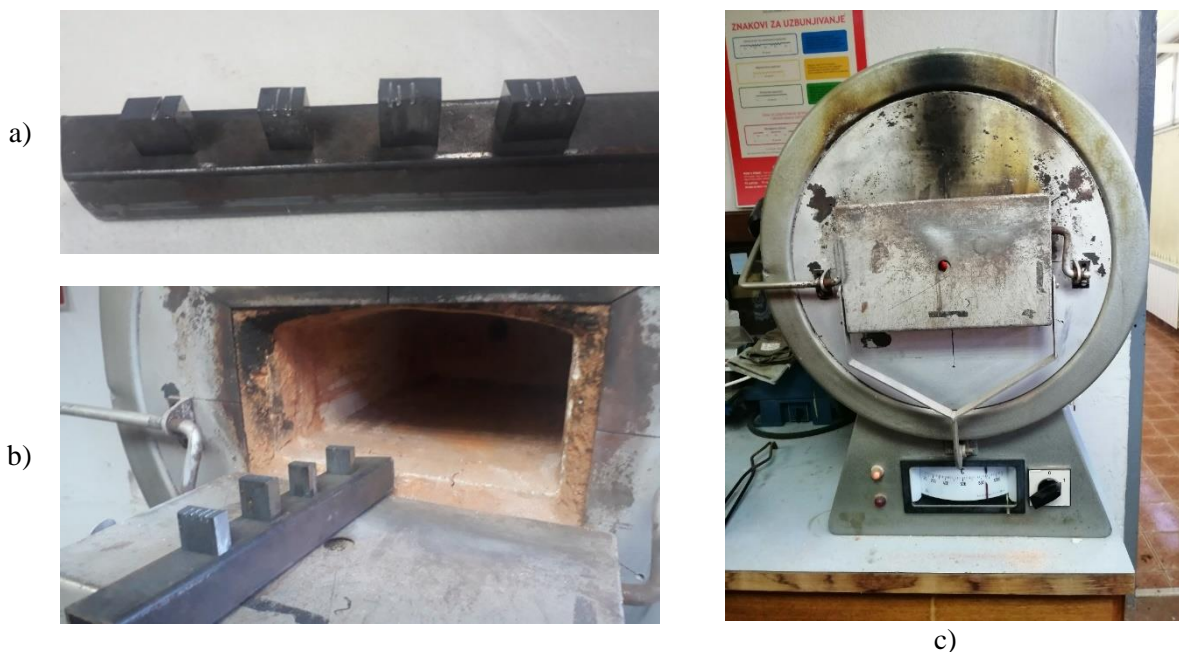
Slika 32. Postavljanje uzorka u stege



Slika 33. Izrezani uzorci: lijevi stupac za analizu i desni stupac za toplinsku obradu

### 3.4. Toplinska obrada

Toplinska obrada, koja se sastoji od zagrijavanja uzoraka provedena je u elektro peći snage 2,5 kW, prikazanoj na slici 34c. Označeni uzorci zarezanim crticama prvo su postavljeni na podložak (slika 34a), koji se zatim postavlja u elektro peć (slika 34b) u kojoj su se uzorci zagrijavali (slika 34c) do 850°C postepeno jedan sat i 50 minuta. Vrijeme je bilo dovoljno da se mali i tanki uzorci ravnomjerno progriju.



Slika 34. Označeni uzorci: a) postavljeni na podložak, b) umetnuti u elektro peć i c) zagrijavani u elektro peći

Nakon dva sata držanja uzoraka na temperaturi od 850°C uzorci su izvađeni iz elektro peći (slika 35a) i naglo ohlađeni u vodi (slika 35b).



a)



b)

Slika 35. Uzorci: a) zagrijani u elektro peći i b) naglo ohlađeni u vodi

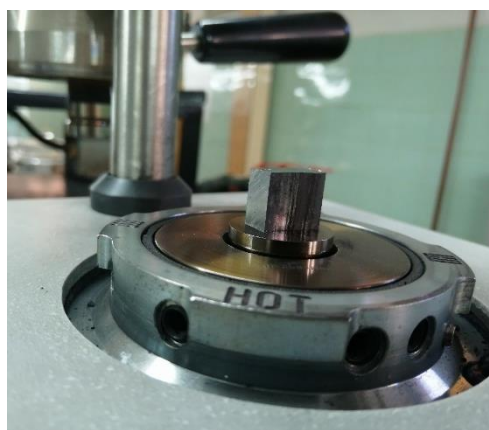
Ohlađeni toplinski obrađeni uzorci nakon kovanja spremni su za pripremu kako bi se na njim mogla provesti metalografska analiza.

### 3.5. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu

Uzorci se nakon rezanja ulažu u masu kako bi se njima lakše rukovalo. Ulaganje je provedeno na uređaju Buehler SimpliMet 1000 za vruće izostatsko prešanje pod tlakom od 250 bara, koji je prikazan na slici 36a. Svaki se uzorak postavlja unutar uređaja ravnim rezanim dijelom okrenutim prema dnu kao što je prikazano na slici 36b.



a)



b)

Slika 36. a) uređaj za vruće izostatsko prešanje (Buehler SimpliMet 1000),  
b) postavljanje razrezanog uzorka u uređaj

Nakon postavljanja uzorka na podnožje komore, preko uzorka se stavi praškasta masa koja toplim prešanjem otvrdne te nam je na taj način uzorak fiksiran u valjkastoj masi i omogućeno je lakše rukovanje samim uzorkom. Na slici 37 prikazani su uzorci nakon ulaganja u vodljivu masu.



Slika 37. Uzorci nakon prešanja u vodljivu masu

Brušenje i poliranje provodi se kako bi se površina uzoraka temeljito pripremila za mikroskopiju. Postupak brušenja i poliranja uzoraka provedeni su na uređaju "BUEHLER Phoenix Beta", koji je prikazan na slici 38.



Slika 38. Uređaj za brušenje i poliranje "BUEHLER Phoenix Beta"

Uzorci konstrukcijskog čelika brušeni su silom pritiska od 25 N u različitim vremenima. Brušenje je provedeno na brusnim papirima različite gradacije, od grublje do finije (120, 240, 400, 800). Broj okretaja uređaja za brušenje podešen je na 150 u minuti. Prilikom brušenja uzorci su se konstantno hladili vodom kako bi se spriječila eventualna promjena mikrostrukture uslijed djelovanja topline nastale trenjem između brusnog papira i površine metalnog uzorka te kako bi se odstranile/isprale nečistoće i produkti brušenja. Postupak brušenja prikazan je na slici 39a, dok su parametri brušenja prikazani u tablici 4.

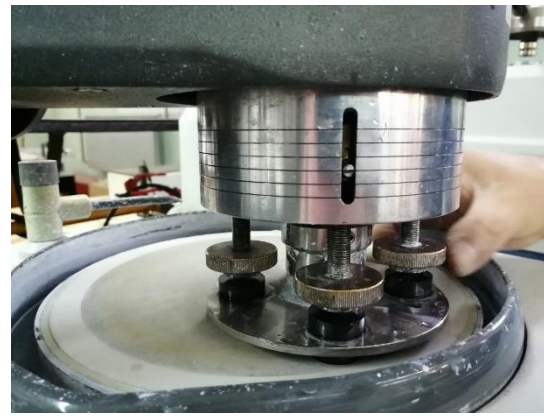
Nakon brušenja slijedi proces poliranja na tkanini za poliranje koji se provodi primjenom praha  $Al_2O_3$  granulacije  $0.3 \mu m$  pomiješanog s vodom. Poliranje se provelo pod silom pritiska od 25 N u vremenu od 5 minuta. Postupak poliranja prikazan je na slici 39b, dok su parametri poliranja prikazani u tablici 4.

Postupak poliranja i brušenja bio je identičan i za uzorke koji su samo kovani i za uzorke koji su nakon kovanja toplinski obrađeni.





a)



b)

Slika 39. Postupak: a) brušenja uzoraka, b) poliranja uzoraka

Tablica 4. Parametri brušenja i poliranja uzoraka čelika uloženi u masu

| Brušenje            |                  |  |                                |                |              |
|---------------------|------------------|--|--------------------------------|----------------|--------------|
| Podloga             | Granulacija zrna | Medij  | Brzina rotacije ploče, okr/min | Tlačna sila, N | Vrijeme, min |
| SiC – papir         | 120              | voda   | 150                            | 25             | 2            |
|                     | 240              |  |                                | 25             | 3            |
|                     | 400              |  |                                | 25             | 5            |
|                     | 800              |  |                                | 25             | 10           |
| Poliranje           |                  |  |                                |                |              |
| Podloga             | Granulacija zrna | Medij  | Brzina rotacije ploče, okr/min | Tlačna sila, N | Vrijeme, min |
| Tkanina (tzv. filc) | mikrovlakna      | voda + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,3 μm) | 150                            | 25             | 5            |

Uzorci su polirani sa svrhom eliminiranja riseva odnosno ogrebotina sve dok nije postignuta zrcalna površina uzoraka. Svaka faza brušenja i poliranja kontrolirana je pomoću svjetlosnog mikroskopa prikazanog na slici 40, kako bi se pratio napredak brušenja odnosno poliranja.



Slika 40. Metalografski svjetlosni mikroskop Leica Ortholux

Nakon što su uzorci ispolirani ispiru se vodom i čiste alkoholom te suše sušilom za kosu. Ispolirani i očišćeni uzorci prikazani su na slici 41.



Slika 41. Ispolirani i očišćeni uzorci

Nakon provedenog postupka brušenja i poliranja uzorci su nagrizeni nital-om (5 %-tna otopina dušične kiseline ( $\text{HNO}_3$ ) u alkoholu ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )). Nagrizanje uzoraka prikazano je na slici 42. Na taj način se uklanjaju slojevi oksida ili nečistoće s površine uzoraka te zrno postaje vidljivo za metalografsku analizu na mikroskopu.



Slika 42. Nagrizanje nital-om

Nakon provedenog nagrizanja provedena je završna vizualna kontrola mikroskopom radi provjere nagrizenosti uzoraka te se pristupa analizi mikrostrukture zavarenih uzoraka pod različitim povećanjima.

Metalografska analiza sabijenih nagrizenih uzoraka provedena je pomoću invertnog metalografskog mikroskopa Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP70 prikazanim na slici 43. Uređaj je opremljen programskim paketom za automatsku obradu slike Analysis Materials Research Lab.



Slika 43. Invertni metalografski mikroskop Olyimpus GX51 s digitalnom kamerom DP70

### 3.6. Mjerenje tvrdoće

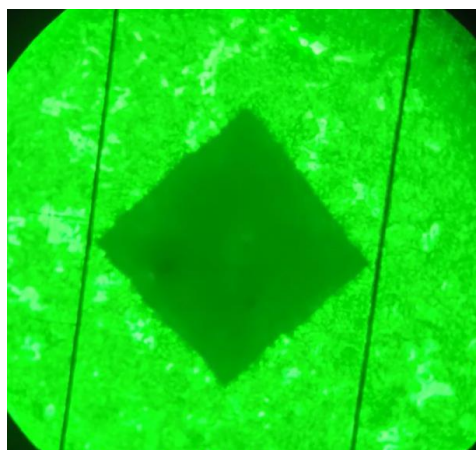
Nakon provedene metalografske analize sabijenim uzorcima izmjerena je tvrdoća metodom po Vickersu. U toj metodi površina uzorka koji se ispituje treba biti ravna i glatka, kako bi se dijagonale otiska mogle točno izmjeriti. Prilikom pripremanja površine uzorka potrebno je izbjegavati postupke kojima se mijenja stanje materijala, kao što su zagrijavanje, hladna prerada i slično. Priprema površine uzorka provedena je postupkom brušenja na vodobrusnim papirima i poliranja na tkaninama za poliranje što je prikazano u tablici 4.

U ovom radu mjerenje tvrdoće sabijenih uzoraka provedeno je metodom po Vickersu na uređaju za mjerenje tvrdoće Mitutoyo prikazanom na slici 44. Mjerenja tvrdoće provedena su s opterećenjem od 10 kg što odgovara sili  $F = 98,1 \text{ N}$  u vremenu od 15 sekundi. U teorijskom dijelu objašnjeno je mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu gdje se indenter u obliku

četverostrane dijamentne piramide s vršnim kutom od  $136^\circ$  utiskuje u materijal silom  $F$ , dok materijal pruža otpor tom prodiranju. Nakon utiskivanja indentora na površini uzorka ostaje kvadratni otisak čije se dijagonale mjere pomoću uređaja, što je prikazano na slici 45. Sam uređaj na osnovu izmjerenih dijagonala izračunava površinu utiskivanja.

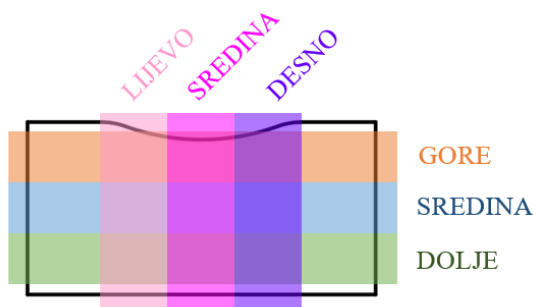


Slika 44. Uređaj Mituyoto



Slika 45. Mjerenje dijagonala otiska

Prije početka mjerenja tvrdoće, uređaj je potrebno nulirati i kalibrirati, tj. provjeriti točnost njegovog mjerenja. Nuliranje operater provodi primicanjem mjernih linija na uređaju dok ne dođu u kontakt jedna s drugom. Nakon ostvarenog kontakta mjernih linija, operater pritiskom na tipku za nuliranje postavi očitavanje uređaja na nulu. Kalibracija uređaja provodi se pomoću etalona (ploče poznatih vrijednosti tvrdoće za poznatu vrijednost opterećenja). Izmjerena vrijednost tvrdoće na etalonu mora odgovarati iznosu tvrdoće etalona. Nakon kalibracije uređaja, provedeno je mjerenje tvrdoće pripremljenih sabijenih uzoraka po područjima prikazanim na slici 46.



Slika 46. Područja mjerenja tvrdoće sabijenih uzoraka

S obzirom da korišteni uređaj za mjerenje tvrdoće nema mogućnost horizontalnog točnog pomicanja uzoraka između svakog mjerenja, izmjerene tvrdoće provedene su po prikazanim područjima od gore do dolje i od lijevo do desno.

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

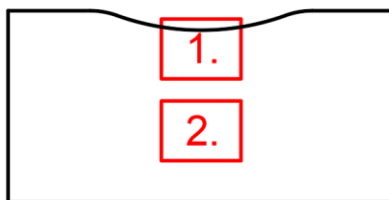
U prvom dijelu ovog diplomskog rada dan je detaljan teorijski pregled provedenih mjerenja kovanja uzoraka i njihove toplinske obrade. Uzorci su kovani različitim brojem udaraca s batom na kovačkom stroju i pri tome, uzorci imaju različit stupanj deformacije. Dio odrezanih uzoraka podvrgnut je toplinskoj obradi koja se sastoji od zagrijavanja i naglog hlađenja u vodi. Cilj ovog istraživanja je uočiti razlike u mikrostrukturi uzoraka prilikom svakog sabijanja kovanjem te mikrostrukturu usporediti s izmjerenim tvrdoćama. Analiza mikrostrukture i mjerenje tvrdoće provedeni su na uzorcima koji su podvrgnuti toplinskoj obradi. Napravljena je i usporedba rezultata.

Nadolazeća podpoglavlja razdvojena su s obzirom na provedbu cjelokupne analize ispitivanja problema sabijanja kovanjem te sabijanja kovanjem i naknadne toplinske obrade. Najprije će biti predstavljeni rezultati metalografske analize uzoraka nakon kovanja te nakon kovanja i naknadne toplinske obrade, koji će odmah biti analizirani. Zatim će biti predstavljeni rezultati mjerenja tvrdoće nakon kovanja te nakon kovanja i naknadne toplinske obrade s analizom.

### 4.1. Metalografska analiza

Metalografska analiza obuhvaća promatranje površine uzoraka pomoću svjetlosnog mikroskopa, koji koristi samo jednu leću za uvećavanje. Pomoću mikroskopa dobiju se informacije o izgledu površine, mikrostrukturi i pojavama u uzorku, poput uključaka, poroznosti, pukotina i drugih. Za dobivanje točnih informacija uzorak je potrebno prethodno metalografski pripremiti na zadovoljavajući način, što je opisano u prethodnoj cjelini. Površine uzoraka koji se ispituju najprije se brusilo, poliralo a onda nagrizlo odgovarajućom otopinom nital. U ovom radu, uzorci su promatrani na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX 51 s digitalnom kamerom Olympus DP 70 pri povećanjima od 50, 100 i 200 puta.

Mikrostruktura uzoraka promatrana je na dva različita mjesta na svakom uzorku kako bi se dobila bolja usporedba. Praćena je mikrostruktura uzoraka uz gornji rub udara batom (položaj 1.) i na sredini uzorka ispod udara bata (položaj 2.), što je prikazano slikom 47.



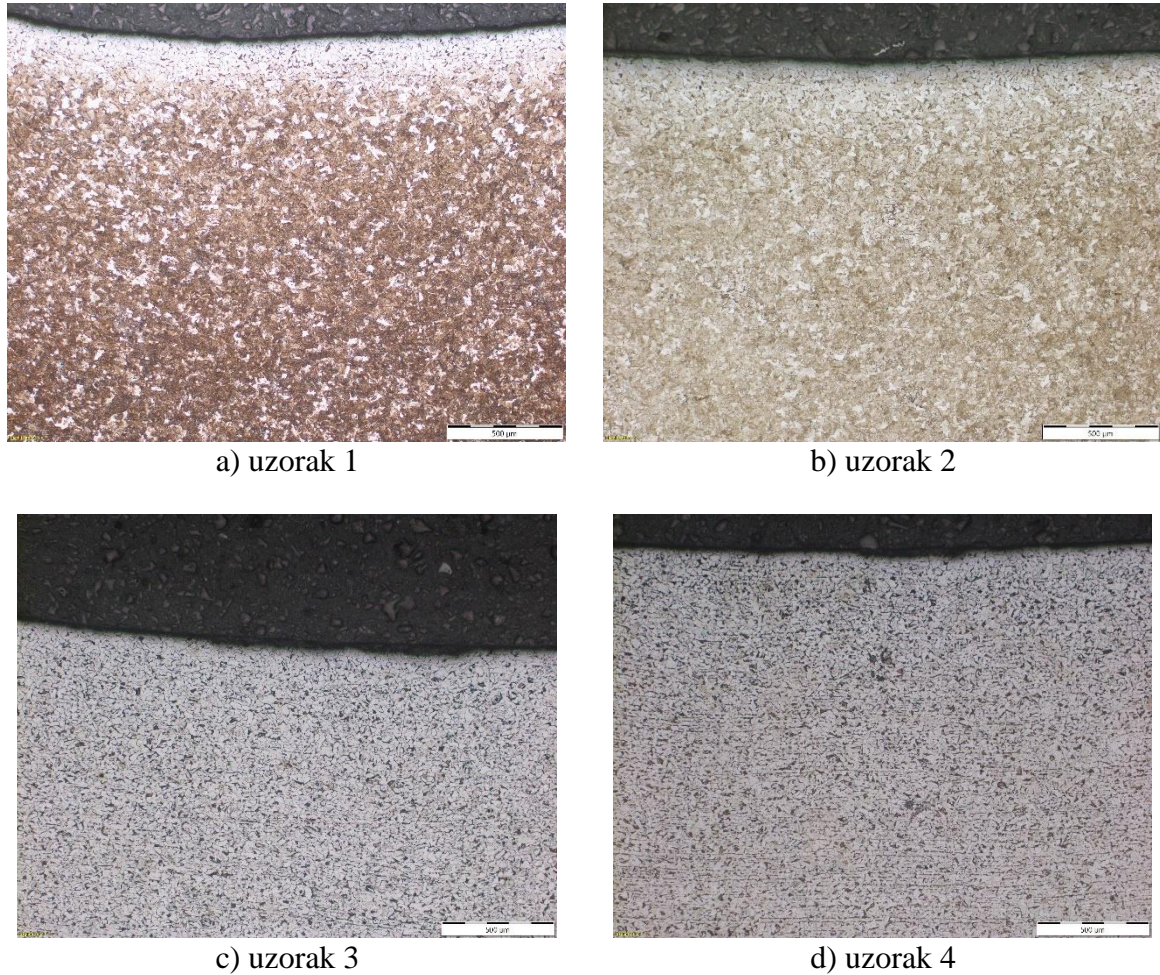
Slika 47. Položaji uzimanja metalografskih snimaka po uzorku

Trakasti uzorci najprije su deformirani kovanjem različitim brojem udara batom, a zatim je dio uzoraka svakog stupnja deformacije podvrgnut toplinskoj obradi koja se sastoji od zagrijavanja i naglog hlađenja. Iz tog razloga promatrani su uzorci pod mikroskopom nakon kovanja i nakon naknadne toplinske obrade. U sljedećim zasebnim cjelinama rezultati će biti prikazani.

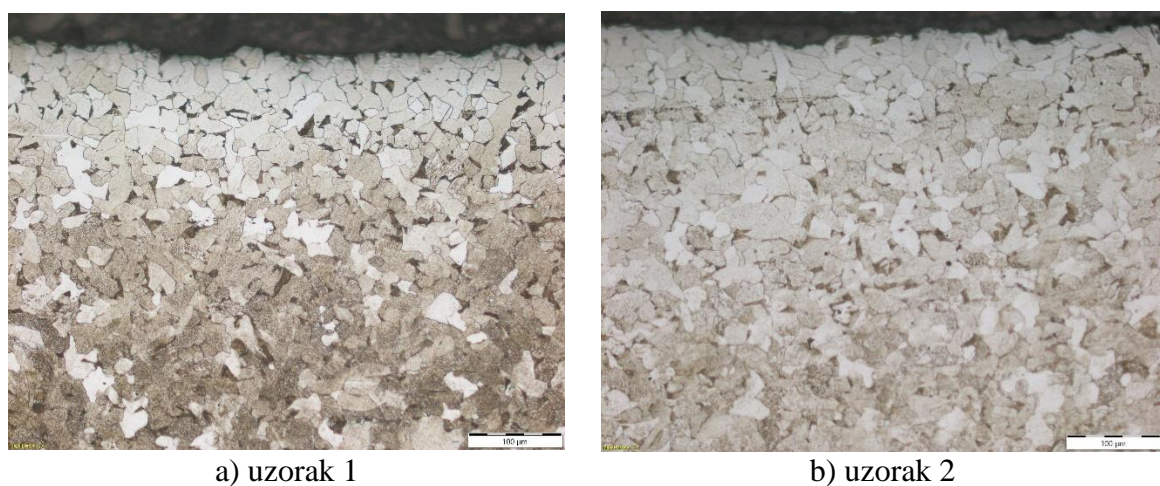


#### 4.1.1. Rezultati metalografske analize nakon kovanja

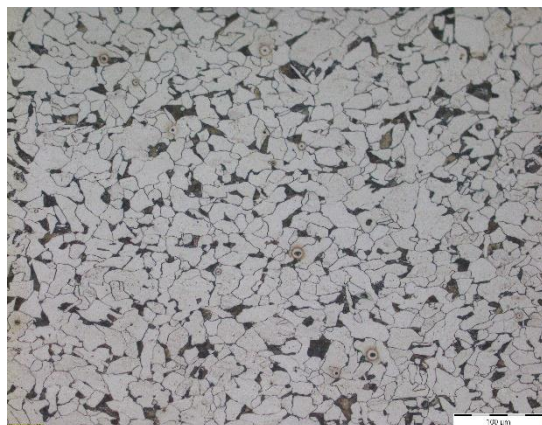
Uzorci različitog stupnja deformiranosti kovanjem pripremljeni su za metalografsku analizu. Pri metalografskoj analizi ustanovljeno je da uzorak 1 i 2 nisu bili dobro nagrizeni nitalom te se postupak nagrivanja morao ponoviti. Metalografski snimci uz gornji rub udara batom (pozicija 1.) pri povećanju 50x prikazani su na slici 48, a pri povećanju 200x na slici 49.



Slika 48. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon kovanja pri povećanju 50x







c) uzorak 3



d) uzorak 4

Slika 49. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon kovanja pri povećanju 200x

Metalografski snimci na sredini uzoraka ispod udara bata (položaj 2.) pri povećanju 50x prikazani su na slici 50, a pri povećanju 200x na slici 51.



a) uzorak 1



b) uzorak 2



c) uzorak 3



d) uzorak 4

Slika 50. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon kovanja pri povećanju 50x





a) uzorak 1



b) uzorak 2



c) uzorak 3



d) uzorak 4

Slika 51. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon kovanja pri povećanju 200x

Na prikazanim slikama gornjeg ruba (položaj 1.) i sredine (položaj 2.) vidljiva je feritno-perlitna struktura koja je sve sitnija idući od uzorka 1 prema uzorku 4, pri čemu je stupanj deformacije sve veći. Zrna uslijed drobljenja postaju sve manja.

#### ***4.1.2. Rezultati metalografske analize nakon kovanja i toplinske obrade***

Uzorci različitog stupnja deformiranosti kovanjem i naknadnom toplinskom obradom pripremljeni su za metalografsku analizu. Metalografski snimci uz gornji rub udara batom (pozicija 1.) pri povećanju 50x prikazani su na slici 52, a pri povećanju 200x na slici 53.





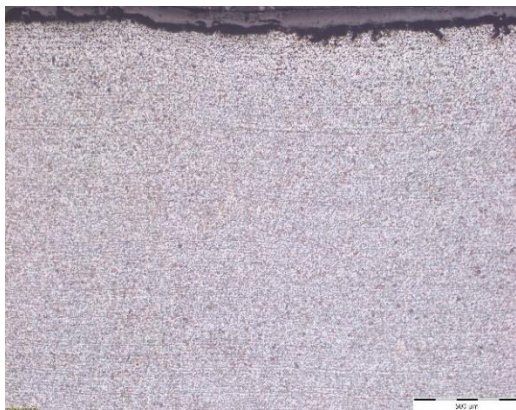
a) uzorak 1



b) uzorak 2



c) uzorak 3

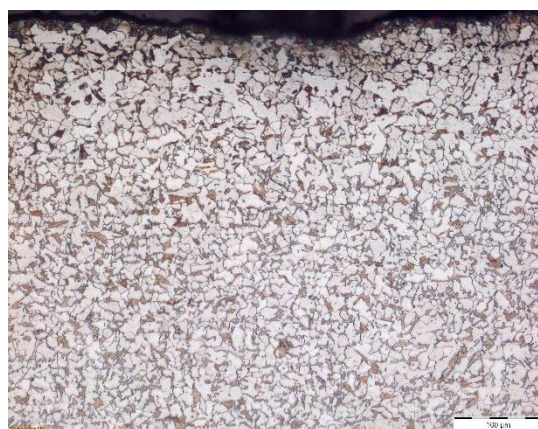


d) uzorak 4

Slika 52. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 50x



a) uzorak 1



b) uzorak 2





c) uzorak 3



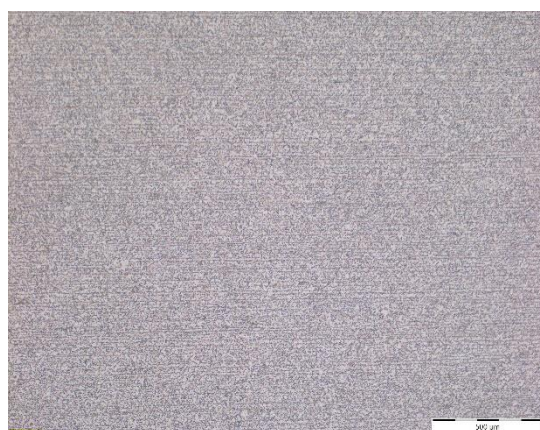
d) uzorak 4

Slika 53. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 200x

Metalografski snimci na sredini uzoraka ispod udara bata (položaj 2.) pri povećanju 50x prikazani su na slici 54, a pri povećanju 200x na slici 55.



a) uzorak 1



b) uzorak 2



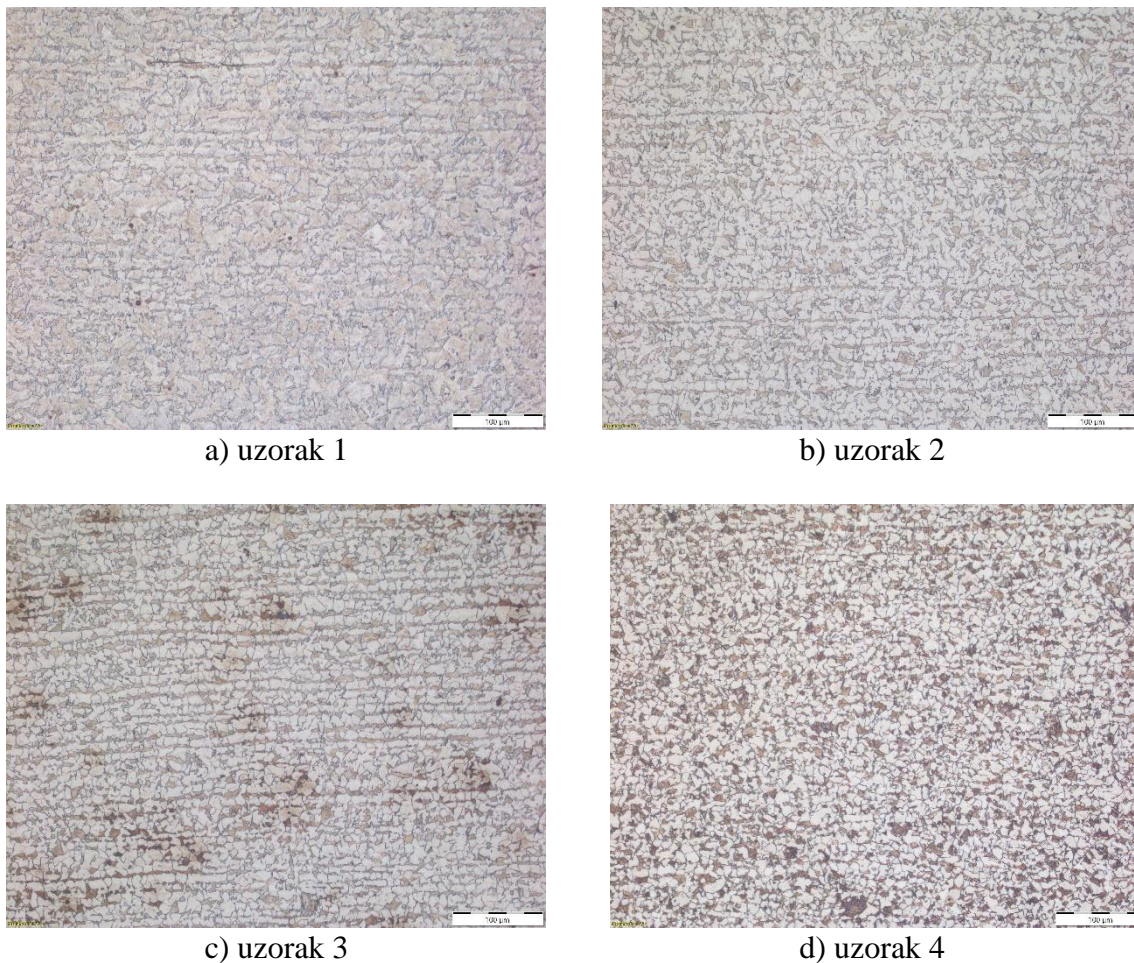
c) uzorak 3



d) uzorak 4

Slika 54. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 50x





Slika 55. Metalografski snimci sredine uzoraka nakon toplinske obrade pri povećanju 200x

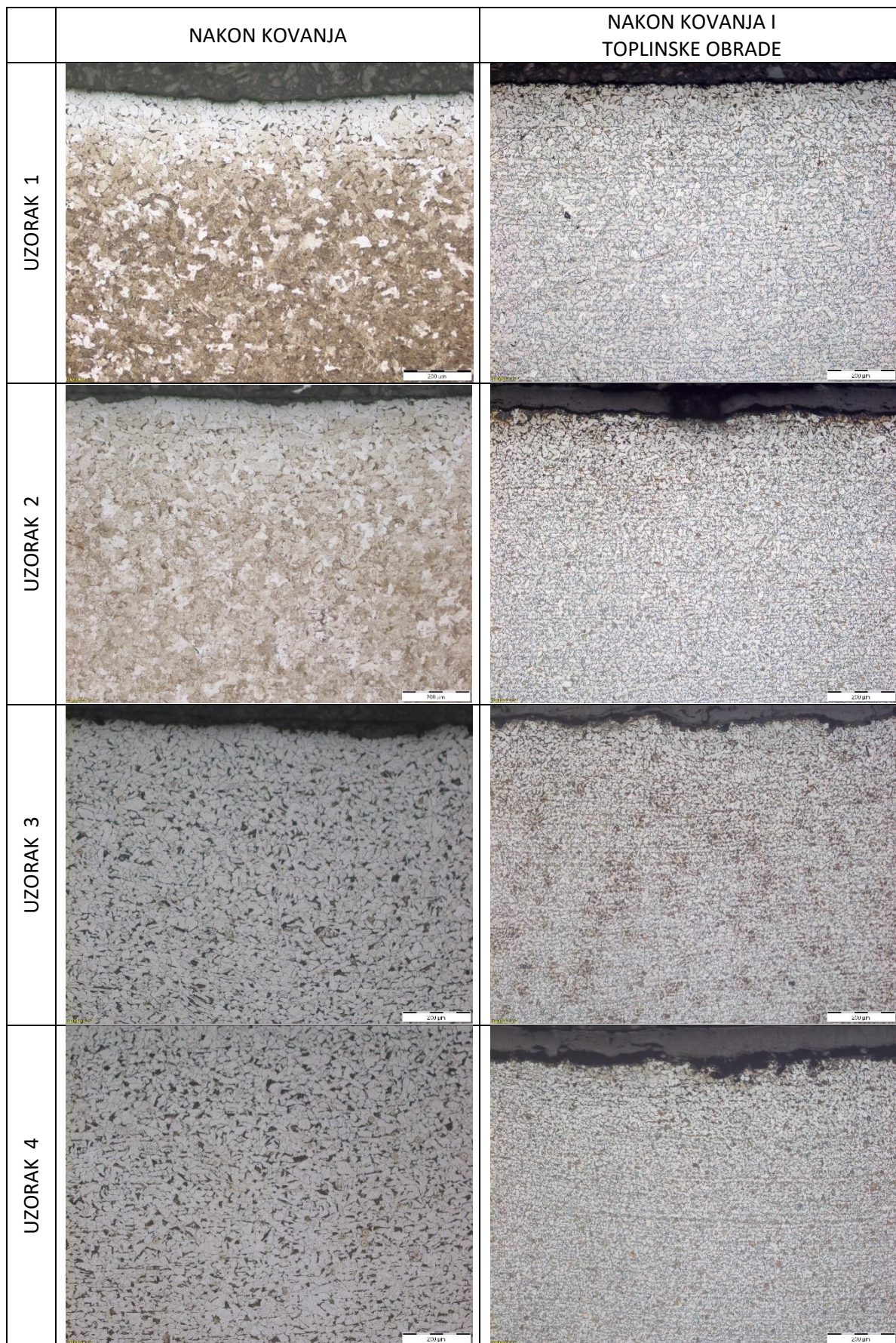
Na prikazanim slikama gornjeg ruba (položaj 1.) i sredine (položaj 2.) vidljiva je feritno-perlitna struktura koja je sve sitnija idući od uzorka 1 prema uzorku 4, pri čemu je stupanj deformacije sve veći. Krivulja hlađenja prema slici 22 u teorijskom dijelu rada bila bi označena brojem 6. Da je količina vode za hlađenje uzorka bila veća krivulja bi bila strmija.

#### ***4.1.3. Usporedba rezultata metalografske analize***

Metalografski snimci gornjeg ruba uzorka različitog stupnja deformiranosti nakon kovanja te nakon kovanja i naknadne toplinske obrade uspoređeni su pri povećanju od 100x na slici 56 za gornji rub, a na slici 57 za sredinu.

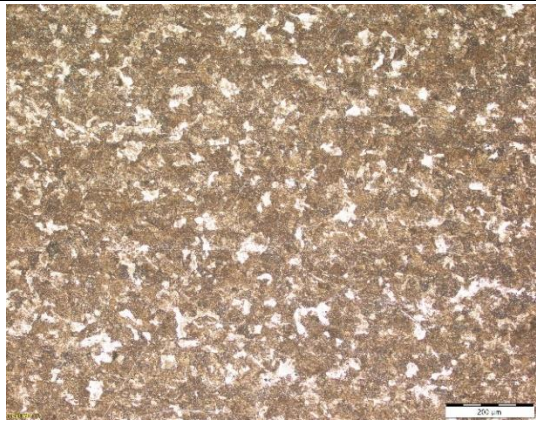

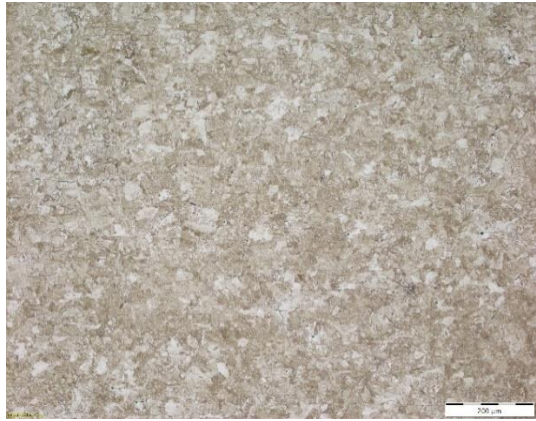

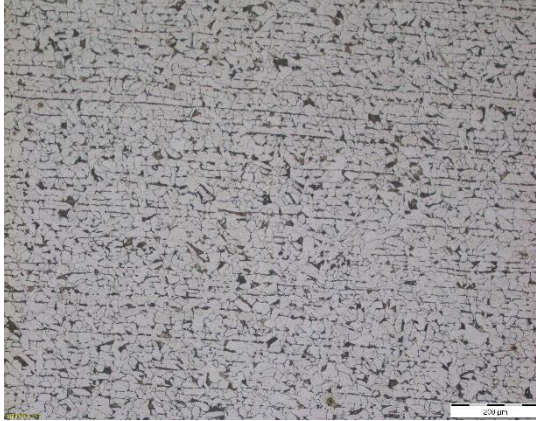



Na prikazanim slikama vidljivo je da je zрно još sitnije na gornjem rubu (položaj 1.) i na sredini uzorka (položaj 2.) nakon toplinske obrade kojoj je prethodilo kovanje.





Slika 56. Metalografski snimci gornjeg ruba uzoraka pri povećanju 100x



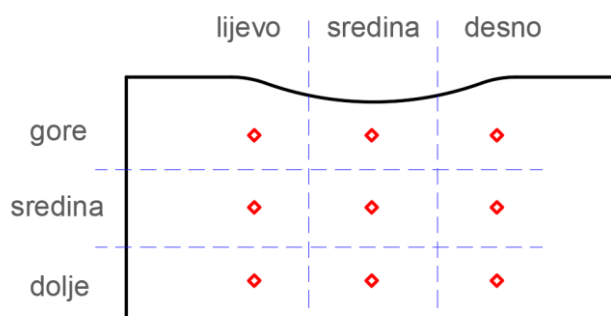
|          | NAKON KOVANJA   | NAKON KOVANJA I<br>TOPLINSKE OBRADJE   |
|----------|---|--|
| UZORAK 1 |    |    |
| UZORAK 2 |   |   |
| UZORAK 3 |  |  |
| UZORAK 4 |  |  |

Slika 57. Metalografski snimci sredine uzoraka pri povećanju 100x



## 4.2. Tvrdoća metodom po Vickersu

Ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom po Vickersu s primijenjenim opterećenjem od 10 kg u vremenu od 15 sekundi. S 9 položaja na svakom uzorku (slika 58) izmjereni su otisci utiskivanja dijamantnog prizmatičnog indentora.



Slika 58. Položaji utiskivanja indentora

Trakasti uzorci najprije su deformirani kovanjem različitim brojem udara batom, a zatim je dio uzoraka svakog stupnja deformacije podvrgnut toplinskoj obradi koja se sastoji od zagrijavanja i naglog hlađenja. Iz tog razloga mjerena je tvrdoća na uzorcima tvrdomjerom nakon kovanja i nakon naknadne toplinske obrade. U sljedećim zasebnim cjelinama rezultati će biti prikazani.

### 4.2.1. Tvrdoća nakon kovanja

Uzorci različitog stupnja deformiranosti kovanjem pripremljeni su za mjerenja tvrdoće metodom po Vickersu. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća po prikazanim položajima prikazani su u tablicama. U tablici 5 prikazane su izmjerena vrijednosti tvrdoće za uzorak 1, u tablici 6 za uzorak 2 u tablici 7 za uzorak 3, a u tablici 8 za uzorak 4. Svim izmjerenim vrijednostima izračunata je srednja (uprosječena) vrijednost po prikazanim položajima za određeni redak (gore/sredina/dolje) i određeni stupac (lijevo/sredina/desno) te po cijelom uzorku.

Tablica 5. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja

| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 1      | GORE               | 166,3  | 177,5   | 164,4 | 169,4              |
|        | SREDINA            | 165,7  | 175,4   | 163,9 | 168,3              |
|        | DOLJE              | 163,2  | 164,6   | 163,3 | 163,7              |
|        | Srednja vrijednost | 165,1  | 172,5   | 163,9 | 167,1              |

Tablica 6. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja

| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 2      | GORE               | 188,3  | 198,3   | 182,7 | 189,6              |
|        | SREDINA            | 181,6  | 197,7   | 177,7 | 185,9              |
|        | DOLJE              | 171,9  | 189,5   | 165,4 | 175,6              |
|        | Srednja vrijednost | 180,6  | 195,2   | 175,3 | 183,7              |

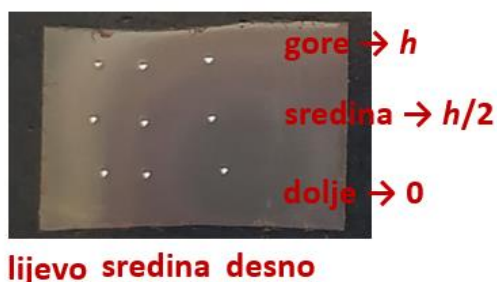
Tablica 7. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja

| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 3      | GORE               | 214,2  | 219,5   | 217,7 | 217,1              |
|        | SREDINA            | 209,7  | 216,1   | 212,7 | 212,8              |
|        | DOLJE              | 209,4  | 211,7   | 208,6 | 209,9              |
|        | Srednja vrijednost | 211,1  | 215,8   | 213,0 | 213,3              |

Tablica 8. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja

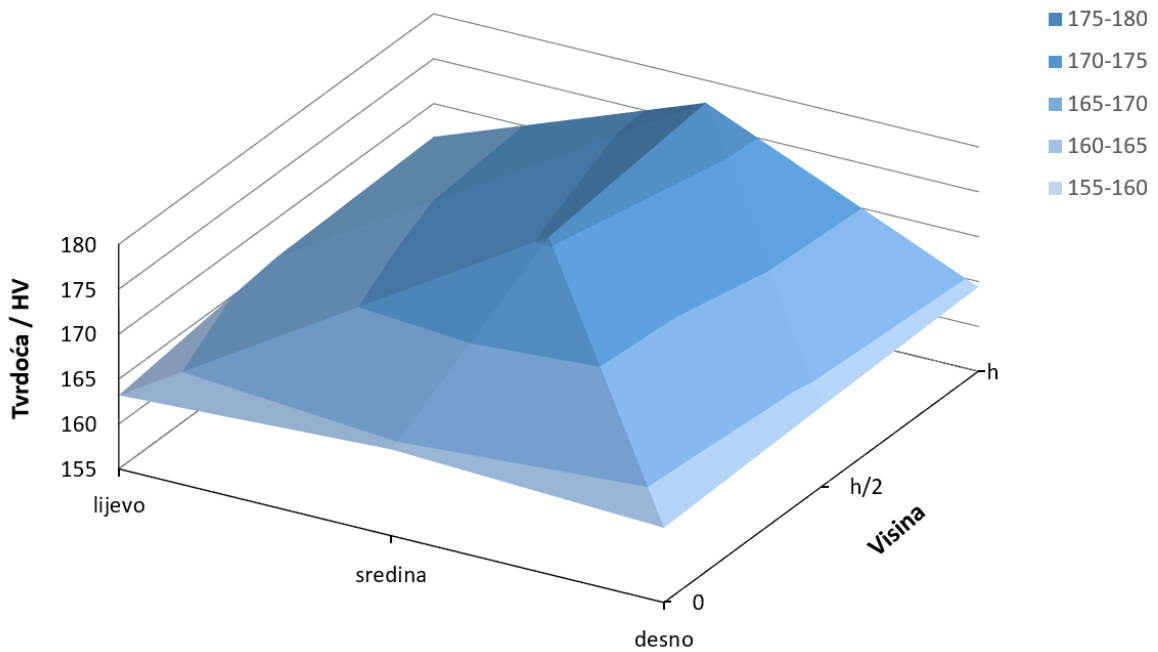
| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 4      | GORE               | 216,8  | 224,2   | 217,7 | 219,6              |
|        | SREDINA            | 210,6  | 220,2   | 211,5 | 214,1              |
|        | DOLJE              | 210,1  | 215,2   | 210,6 | 212,0              |
|        | Srednja vrijednost | 212,5  | 219,9   | 213,3 | 215,2              |

Izmjerene tablično prikazane vrijednosti tvrdoća na svakom uzorku po položaju bit će bolje predočene prostornim dijagramom po visini kovane trake, gdje oznake na osima donje baze dijagrama odgovaraju opisu prikazanom na slici 59.

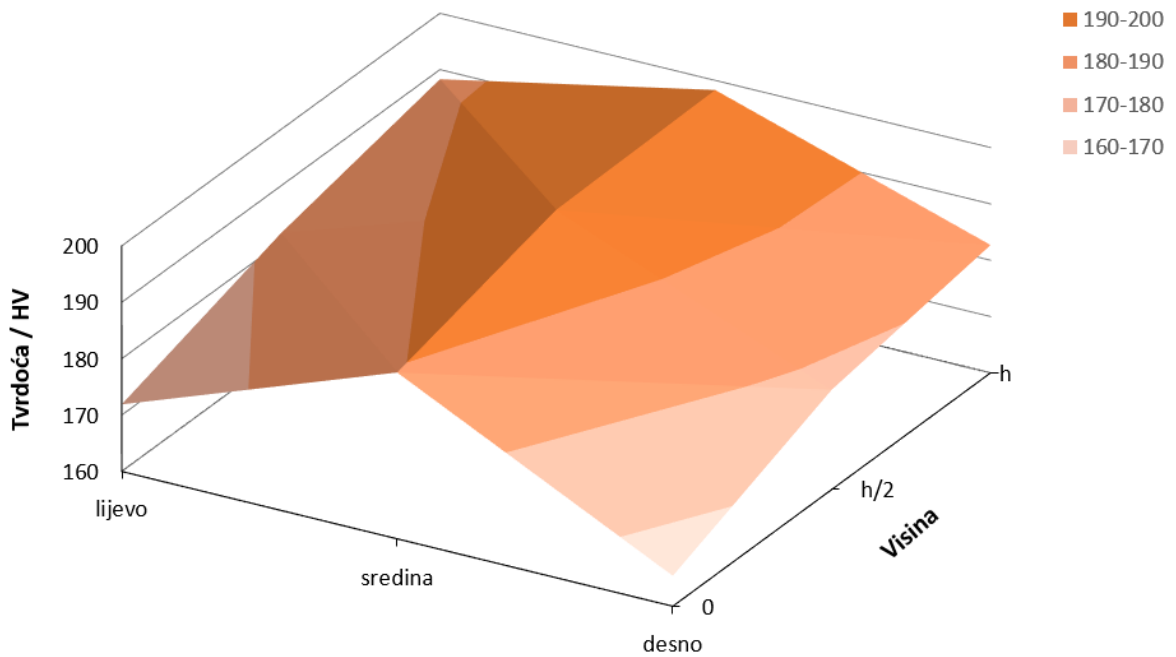


Slika 59. Shema prikaza donje baze na prostornom dijagramu za svaki uzorak

Izmjerene vrijednosti tvrdoća na svakom uzorku po položaju prikazane su prostornim dijagramom pomoću linearne interpolacije i to za uzorak 1 na slici 60, za uzorak 2 na slici 61, za uzorak 3 na slici 62 te za uzorak 4 na slici 63.

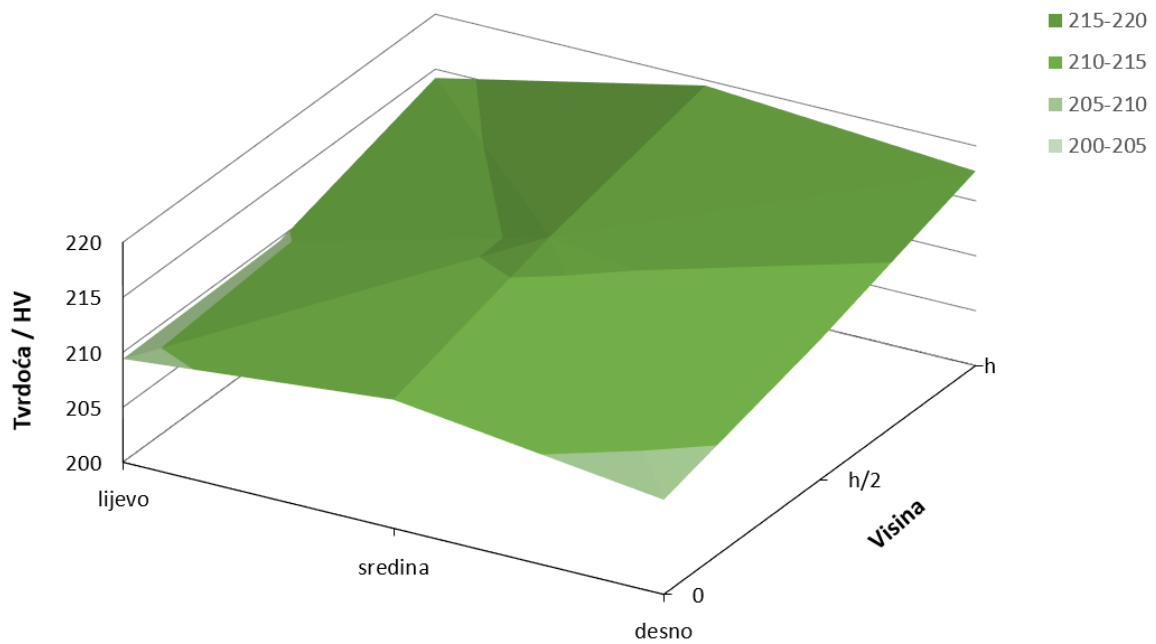


Slika 60. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja

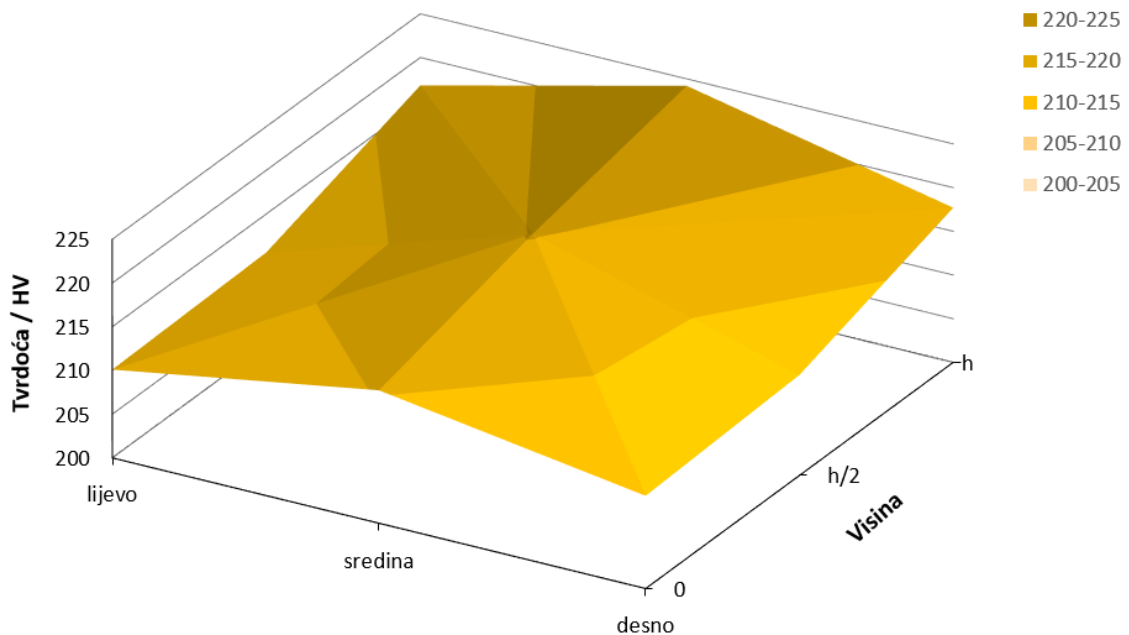


Slika 61. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja



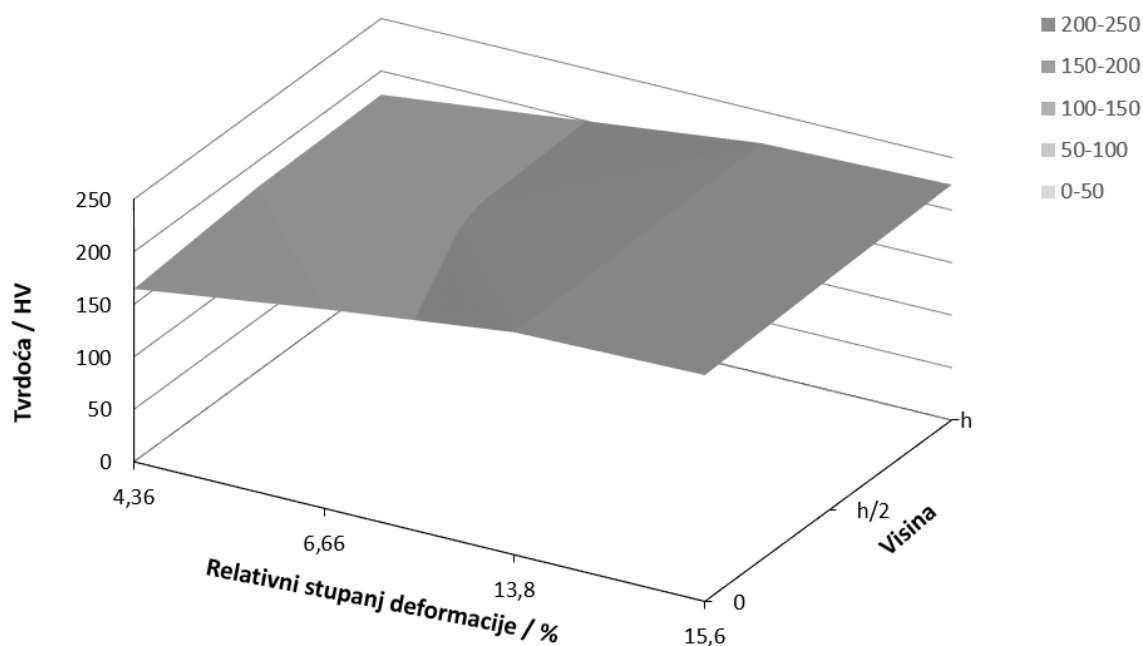


Slika 62. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja



Slika 63. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja

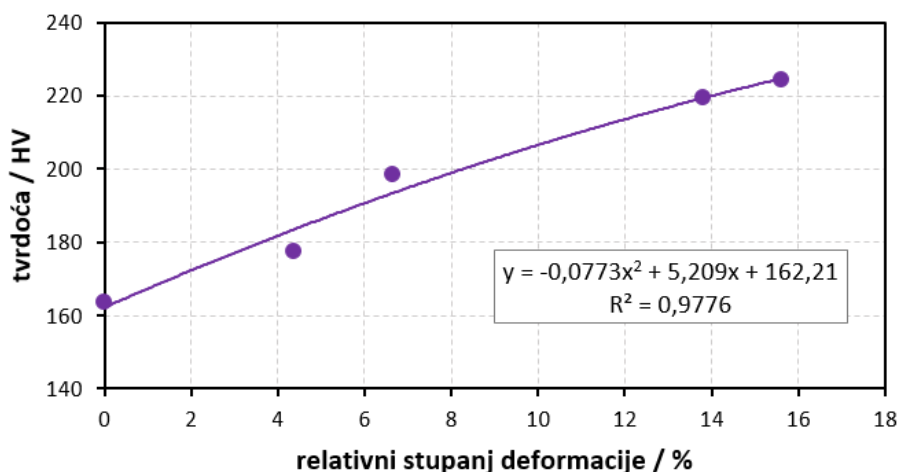
Kako bi se što bolje analizirale vrijednosti tvrdoća karakterističnih položaja na svakom uzorku napravljena je njihova ovisnost o relativnom stupnju deformacije koji se za svaki uzorak povećava. Uzorak 0 je nedeformirani, uzorak 1 ima 4,36% deformacije, uzorak 2 ima 6,66% deformacije, uzorak 3 ima 13,8% deformacije i uzorak 4 ima 15,62% deformacije sabijanja. Na slici 64 prikazana je linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće na prostornom dijagramu na sredini udara batom po visini trake svakog uzorka.



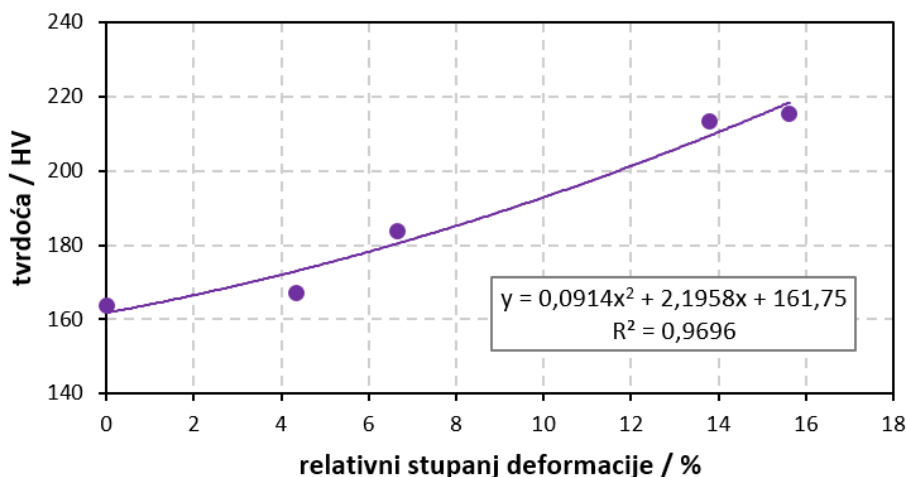
Slika 64. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za sredinu po visini trake nakon kovanja

Na slici 64 primjećuje se povećanje vrijednosti tvrdoća s povećanjem relativnog stupnja deformacije nakon kovanja i s približavanjem mjestu udara batom. Bolja usporedba bit će prikazana u narednim dijagramima.

Ovisnost vrijednosti tvrdoće o relativnom stupnju deformacije prikazana je na slici 65 za sredinu gore svakog uzorka. Na slici 66 prikazana je ovisnost uprosječne tvrdoće o relativnom stupnju deformacije zanemarujući položaj utiskivanja po uzorcima. Tvrdoća uzorka 0 koji nije podvrgnut deformiranju batom uzeta je iz srednje vrijednosti uzorka 1 na donjem dijelu.



Slika 65. Ovisnost vrijednosti tvrdoća na sredini gore po svakom uzorku o relativnom stupnju deformacije pri kovanju



Slika 66. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća uzoraka o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju

Svaka prikazana ovisnost vrijednosti tvrdoća o relativnom stupnju deformacije kovanja je aproksimirana kvadratnom funkcijom u kojoj  $x$  predstavlja vrijednost relativnog stupnja deformacije, a  $y$  vrijednost tvrdoće. Točnost aproksimacije definirana je veličinom  $R^2$  (engl. *coefficient of determination*).  $R^2$  je koeficijent determinacije koji predstavlja procjenu ukupne varijacije podataka aproksimiranih pomoću modela. Što je bolja aproksimacija eksperimentalnih vrijednosti modelom, vrijednost  $R^2$  bliža je jedinici, a ako je jednaka jedinici onda je točnost aproksimacije 100 %. U svim analizama aproksimirana kvadratna ovisnost ima koeficijent determinacije  $R^2$  jednak 0,9696 i 0,9776, što je vrlo zadovoljavajuća aproksimacija.

U svim analizama aproksimirana kvadratna ovisnost raste s povećanjem stupnja deformacije tj. s promatranjem sve sabijenijeg uzoraka.

#### 4.2.2. Tvrdoća nakon kovanja i toplinske obrade

Uzorci različitog stupnja deformiranosti kovanjem nakon toplinske obrade pripremljeni su za mjerenja tvrdoće metodom po Vickersu. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća po prikazanim položajima prikazani su u tablicama. U tablici 9 prikazane su izmjerena vrijednosti tvrdoće za uzorak 1, u tablici 10 za uzorak 2 u tablici 11 za uzorak 3, a u tablici 12 za uzorak 4. Svim izmjerenim vrijednostima izračunata je srednja (uprosječena) vrijednost po prikazanim položajima za određeni redak (gore/sredina/dolje) i određeni stupac (lijevo/sredina/desno) te po cijelom uzorku.

Tablica 9. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja i toplinske obrade

| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 1      | GORE               | 194,6  | 205,7   | 201,0 | 200,4              |
|        | SREDINA            | 186,0  | 192,4   | 186,7 | 188,4              |
|        | DOLJE              | 181,1  | 184,4   | 181,3 | 182,3              |
|        | Srednja vrijednost | 187,2  | 194,2   | 189,7 | 190,4              |

Tablica 10. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja i toplinske obrade

| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 2      | GORE               | 208,9  | 224,5   | 205,8 | 213,1              |
|        | SREDINA            | 203,5  | 212,7   | 200,7 | 205,6              |
|        | DOLJE              | 201,1  | 208,3   | 198,6 | 202,7              |
|        | Srednja vrijednost | 204,5  | 215,2   | 201,7 | 207,1              |

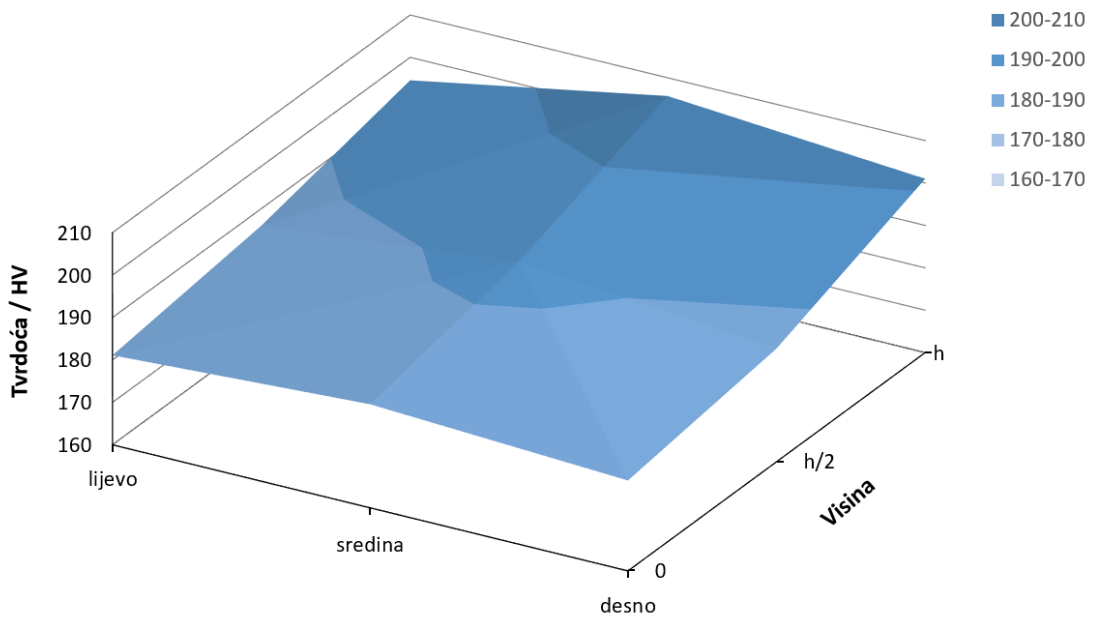
Tablica 11. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja i toplinske obrade

| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 3      | GORE               | 220,9  | 235,0   | 232,1 | 229,3              |
|        | SREDINA            | 213,0  | 216,4   | 215,5 | 215,0              |
|        | DOLJE              | 202,0  | 214,0   | 206,1 | 207,4              |
|        | Srednja vrijednost | 212,0  | 221,8   | 217,9 | 217,2              |

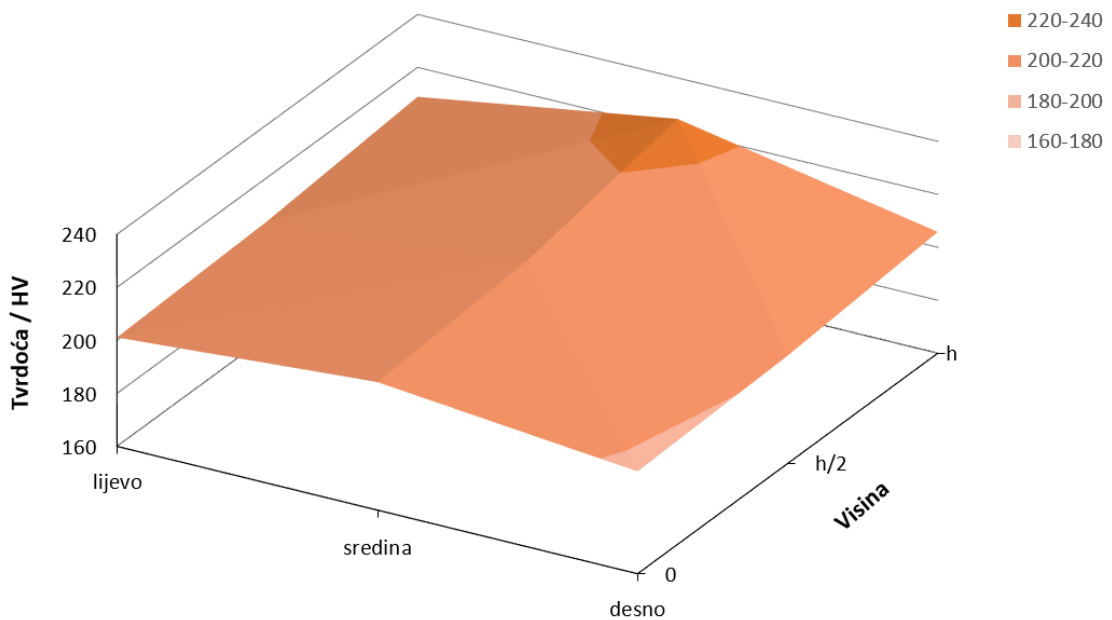
Tablica 12. Vrijednosti izmjerene tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja i toplinske obrade

| UZORAK | HV10, 15 s         |        |         |       | Srednja vrijednost |
|--------|--------------------|--------|---------|-------|--------------------|
|        |                    | LIJEVO | SREDINA | DESNO |                    |
| 4      | GORE               | 233,6  | 237,5   | 233,2 | 234,8              |
|        | SREDINA            | 228,2  | 232,6   | 226,8 | 229,2              |
|        | DOLJE              | 225,1  | 227,2   | 223,4 | 225,2              |
|        | Srednja vrijednost | 229,0  | 232,4   | 227,8 | 229,7              |

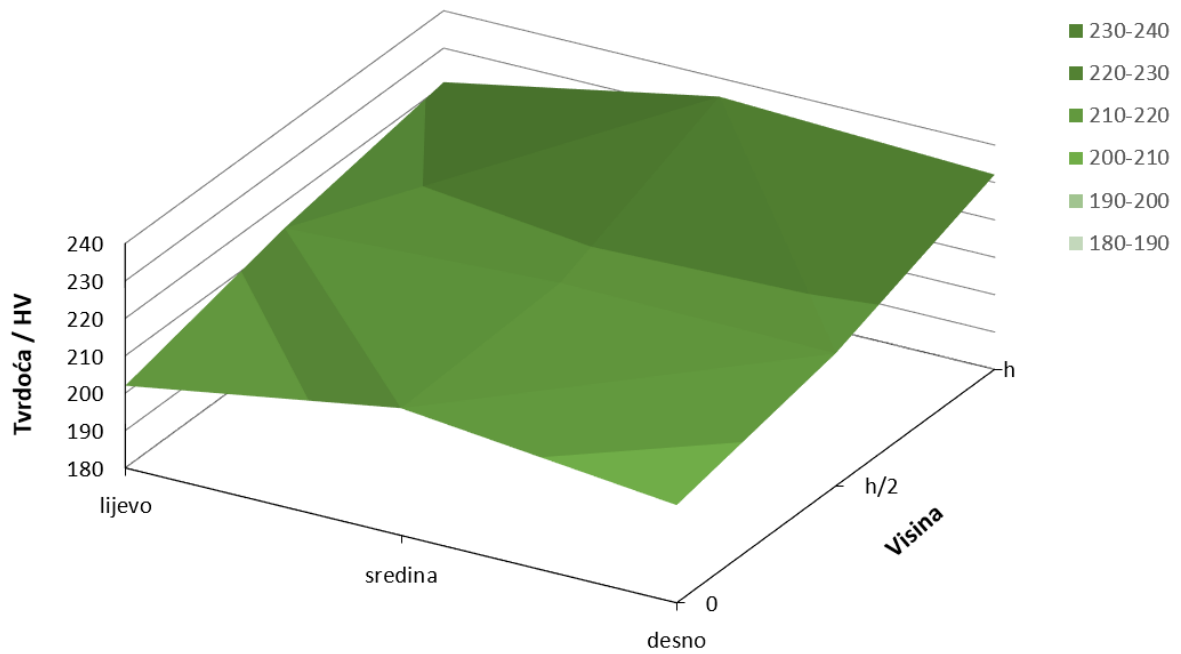
Izmjerene vrijednosti tvrdoća na svakom uzorku po položaju prikazane su prostornim dijagramom pomoću linearne interpolacije i to za uzorak 1 na slici 67, za uzorak 2 na slici 68, za uzorak 3 na slici 69 te za uzorak 4 na slici 70.



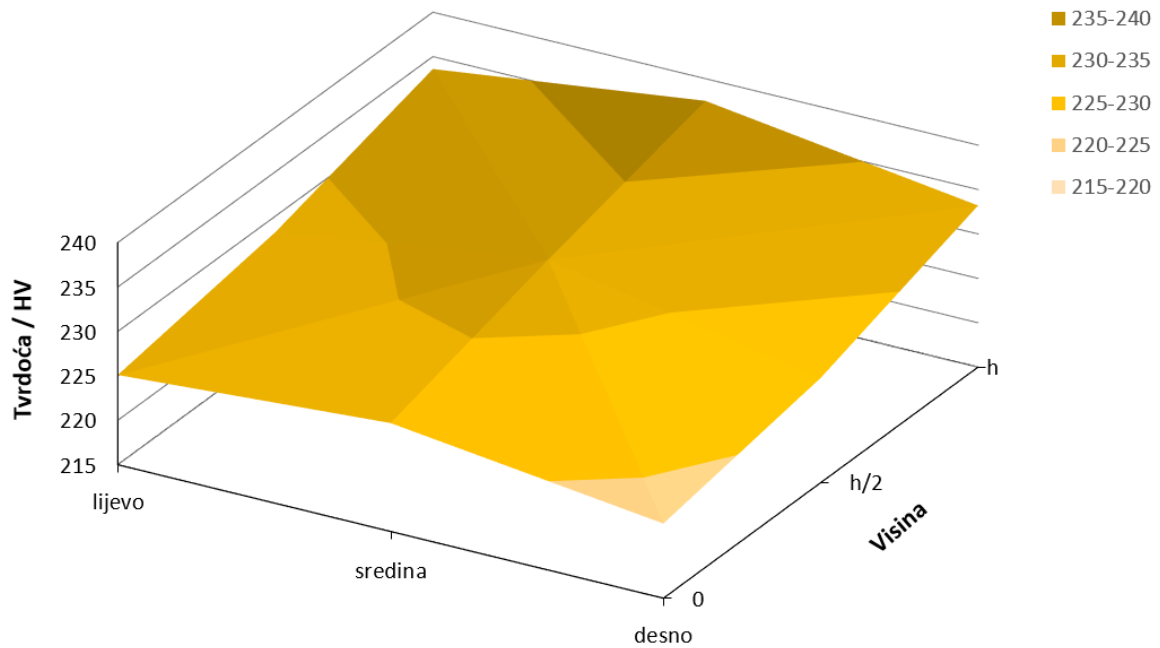
Slika 67. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1 nakon kovanja i toplinske obrade



Slika 68. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2 nakon kovanja i toplinske obrade



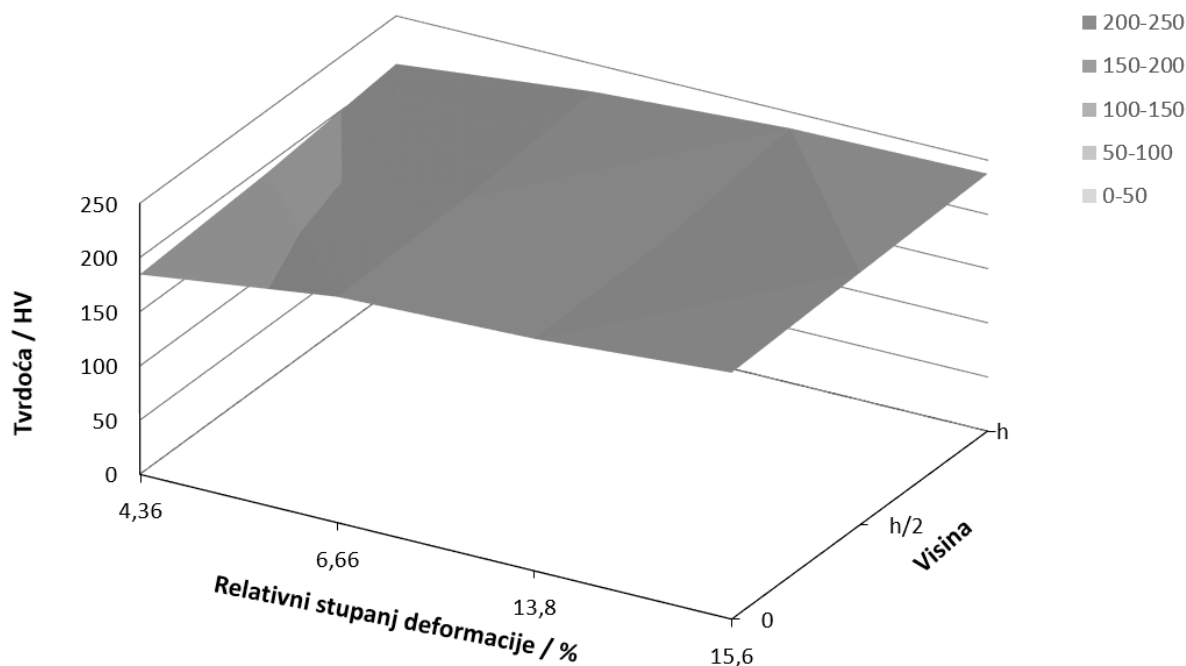
Slika 69. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3 nakon kovanja i toplinske obrade



Slika 70. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4 nakon kovanja i toplinske obrade

Kako bi se što bolje analizirale vrijednosti tvrdoća karakterističnih položaja na svakom uzorku napravljena je njihova ovisnost o relativnom stupnju deformacije koji se za svaki uzorak povećava. Uzorak 0 je nedeformirani, uzorak 1 ima 4,36% deformacije, uzorak 2 ima 6,66% deformacije, uzorak 3 ima 13,8% deformacije i uzorak 4 ima 15,62% deformacije

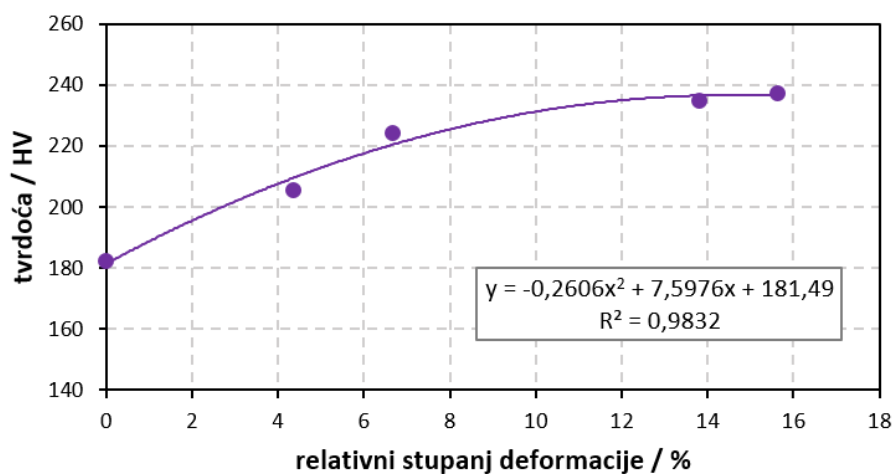
sabijanja. Na slici 71 prikazana je linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće na prostornom dijagramu na sredini udara batom po visini trake svakog uzorka.



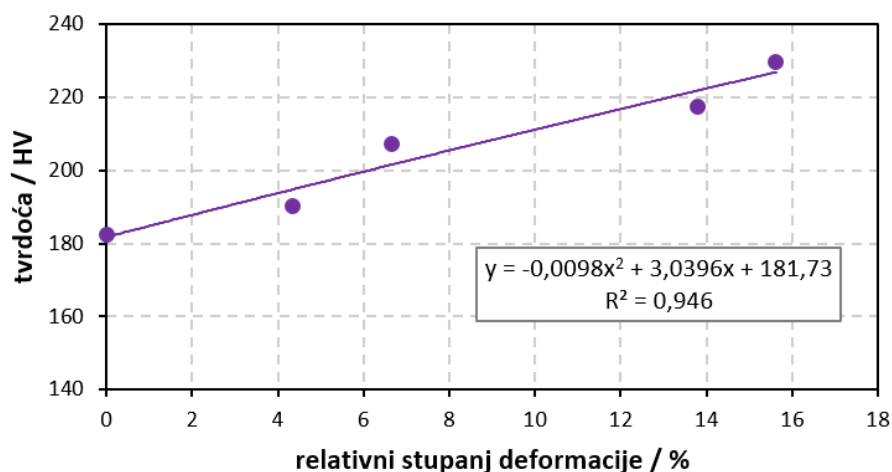
Slika 71. Linearna interpolacija vrijednosti tvrdoće po položaju za sredinu po visini trake nakon kovanja i toplinske obrade

Na slici 71 primjećuje se povećanje vrijednosti tvrdoća s povećanjem relativnog stupnja deformacije nakon kovanja i s približavanjem mjestu udara batom (gornjem rubu). Bolja usporedba bit će prikazana u narednim dijagramima.

Ovisnost vrijednosti tvrdoće o relativnom stupnju deformacije prikazana je na slici 72 za sredinu gore svakog uzorka. Na slici 73 prikazana je ovisnost uprosječne tvrdoće o relativnom stupnju deformacije zanemarujući položaj utiskivanja po uzorcima. Tvrdoća uzorka 0 koji nije podvrgnut deformiranju batom uzeta je iz srednje vrijednosti uzorka 1 na donjem dijelu.



Slika 72. Ovisnost vrijednosti tvrdoća na sredini gore po svakom uzorku o relativnom stupnju deformacije nakon kovanja i toplinske obrade



Slika 73. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća uzoraka o relativnom stupnju deformacije nakon kovanja i toplinske obrade

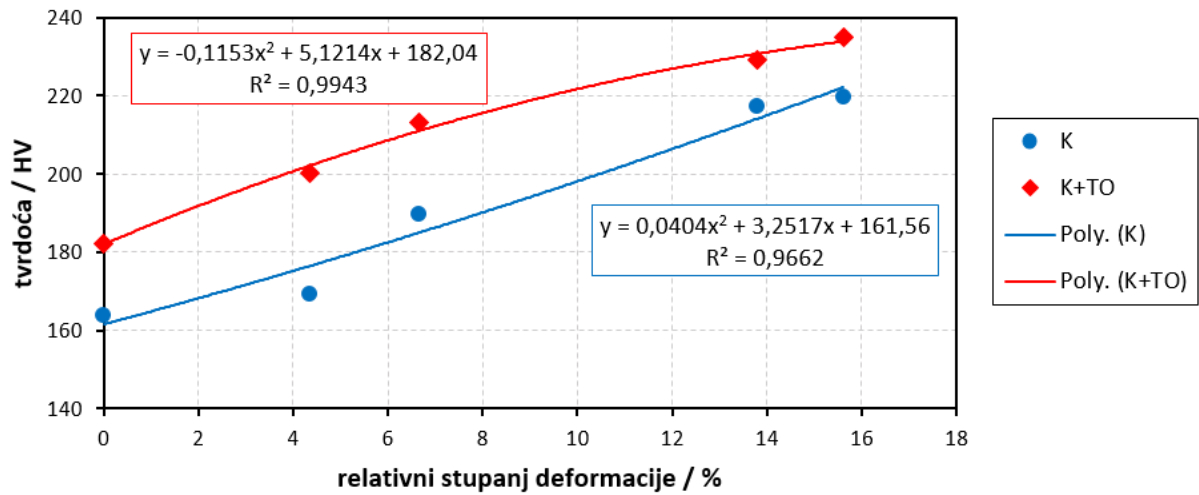
Svaka prikazana ovisnost vrijednosti tvrdoća o relativnom stupnju deformacije kovanja je aproksimirana kvadratnom funkcijom u kojoj  $x$  predstavlja vrijednost relativnog stupnja deformacije, a  $y$  vrijednost tvrdoće. Točnost aproksimacije definirana je veličinom  $R^2$  (engl. *coefficient of determination*).  $R^2$  je koeficijent determinacije koji predstavlja procjenu ukupne varijacije podataka aproksimiranih pomoću modela. Što je bolja aproksimacija eksperimentalnih vrijednosti modelom, vrijednost  $R^2$  bliža je jedinici, a ako je jednaka jedinici onda je točnost aproksimacije 100 %. U svim analizama aproksimirana kvadratna ovisnost ima koeficijent determinacije  $R^2$  jednak 0,946 i 0,9832, što je vrlo zadovoljavajuća aproksimacija.

U svim analizama aproksimirana kvadratna ovisnost raste s povećanjem stupnja deformacije tj. s promatranjem sve sabijenijeg uzoraka.

#### 4.2.3. Usporedba rezultata tvrdoća

Vrijednosti uprosječenih izmjerenih tvrdoća gornjeg ruba uzoraka različitog stupnja deformiranosti nakon kovanja (K) te nakon kovanja i naknadne toplinske obrade (K+TO) uspoređeni su na dijagramu prikazanom na slici 74.





Slika 74. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća gornjeg ruba o različitom stupnju deformiranosti nakon kovanja (K) te nakon kovanja i naknadne toplinske obrade (K+TO)

Na prikazanim slikama vidljivo je da su vrijednosti tvrdoća na gornjem rubu veće nakon toplinske obrade kojoj je prethodilo kovanje nego samo nakon kovanja.

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je provesti eksperiment kovanja trakastih uzoraka materijala konstrukcijskog čelika S275JR (Č.0451) s nekoliko različitih udaraca batom (2, 5, 10 i 20 puta) na mehaničkom kovačkom stroju. Rezultat tog sabijanja kovanjem su različiti stupnjevi deformacije svakog uzorka. Dio izrezanih uzoraka svakog stupnja deformacije podvrgnuti su naknadnoj toplinskoj obradi koja se sastoji od zagrijavanja i naknadnog hlađenja u vodi. Nakon provedenih eksperimenata napravljena je analiza svih uzoraka kako bi se utvrdila njihova različitost. Provedena analiza sastojala se od metalografske analize mikrostrukture i mjerenja tvrdoće.

Provedena istraživanja pokazala su sljedeće:

- metalografskom analizom utvrđeno je da porastom stupnja deformacije dolazi do usitnjenja feritno-perlitnih zrna nakon kovanja i nakon kovanja i toplinske obrade;
- metalografskom analizom utvrđeno je da se intenzivna zbijenost zrna odvija neposredno ispod udarca batom;
- metalografskom analizom utvrđeno je da dolazi do intenzivnijeg usitnjenja zrna nakon naknadno provedene toplinske obrade (zagrijavanje i hlađenje u vodi) s obzirom na provedeno prethodno kovanje;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da tvrdoće na uzorcima rastu kvadratnom funkcijom s povećanjem stupnja deformacije nakon kovanja i nakon kovanja i toplinske obrade;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da su tvrdoće maksimalne, po uzdužnom presjeku trakastog uzorka, na sredini ispod udarca bata;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da su vrijednosti tvrdoće veće nakon naknadno provedene toplinske obrade (zagrijavanje i hlađenje u vodi) s obzirom na provedeno prethodno kovanje;
- mjerenjem tvrdoće i metalografske analize utvrđeno je da sitnije zrnata struktura ima veću tvrdoću.

## 6. LITERATURA

- [1] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2014.
- [2] J. Hribar, Plastična obradba metala, u Tehnička enciklopedija Vol.10, Zagreb, Jugoslavenski Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1963-1997, pp. 311-339.
- [3] I. Mamuzić, Teorija plastične deformacije metala, Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2000.
- [4] M. Horvat, K. PISAČIĆ, Z. Botak i I. Samardžić, Basic strengthening mechanisms of high-strength steels u Engineering technologies in manufacturing of welded constructions and products, Slavonski Brod, Hrvatska, 2021.
- [5] M. Juras, Proračun i konstrukcija alata za kovanje koljenastog vratila, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [6] M. Math, Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1999.
- [7] I. Kosovinc, Tehnička enciklopedija: Metalografija, 8. svezak, Jugoslavenski leksikografski zavod "Miroslav Krleža", Zagreb, 1982, pp. 419-433.
- [8] K. Šimić, Utjecaj sabijanja na tvrdoću čelika, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2022.
- [9] S. Rešković, I. Jandrlić, Tehnologije oblikovanja deformiranjem, sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2022.
- [10] D. Krog, Numerička simulacija popunjavanja gravure u procesu kovanja u otvorenom ukovnju, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2022.
- [11] [kovanje | Hrvatska enciklopedija](#) (preuzeto 28.8.2023.)
- [12] I. Mitrović, Utjecaj brzine deformiranja na krivulju tečenja kod procesa sabijanja u hladnom stanju, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2023.
- [13] I. Slade, Alatni strojevi I, Tehnička škola TESLA, Zagreb, 2021.
- [14] <https://metal-kovis.hr/shop/cijena/hidraulicna-presa-hidroliksan-100t> (preuzeto 25.8.2023.)
- [15] <https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/predavanja/kovanje.pdf> (preuzeto 17.6.2023)
- [16] O. Horvat, Mehanička tehnologija, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1950.
- [17] M. Vukelić, Tradicionalno slobodno kovanje, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac 2019.
- [18] M. Novosel, Toplinska obradba metala, u Tehnička enciklopedija Vol.13, Zagreb, Jugoslavenski Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1963-1997, pp. 103-121.
- [19] M. Paleka, Upravljanje procesima toplinske obrade metala, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [20] Postupci toplinske obrade [file:///C:/Users/korisnik/Downloads/11%20Postupci%20toplinske%20obrade%20%C4%8Delika%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/korisnik/Downloads/11%20Postupci%20toplinske%20obrade%20%C4%8Delika%20(1).pdf) (preuzeto 1.9.2023.)
- [21] I. Gabrić, S. Šitić, Materijali II, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2015.
- [22] T. Filetin, M. Franz, Đ. Španićek and V. Ivušić, Svojstva i karakteristike materijala, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [23] I. Vitez, Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala, Sveučilište Josipa Jurija Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2006.

- [24] I. Vitez, M. Oruč, R. Snulahpašić, Ispitivanje metalnih materijala, Univerzitet u Zenici Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2006. (preuzeto 20.6.2022.)
- [25] E. L. Ritz, Analiza mikrostrukture i tvrdoće sučeno zavarenog spoja MIG postupkom, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2022.
- [26] Z. Majcen, Pouzdanost prijenosnih metoda ispitivanja tvrdoće, diplomski rad, Varaždin: Sveučilište Sjever, 2020.
- [27] <https://www.hardnessgauge.com/testing-types/vickers-hardness-testing/>  
(preuzeto 8.9.2023)
- [28] B. Kraut, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1988.
- [29] P. Zhang, S.X. Li, Z.F. Zhang, General relationship between strength and hardness Materials Science and Engineering A, pp. 62-73, 2011.

# ŽIVOTOPIS

## Osobni podatci:

Ime i prezime: Blanka Krčelić  
Datum i mjesto rođenja: 12. rujna 1994., Sisak  
Adresa: Ljudevita Gaja 16  
Grad: Petrinja  
Država: Republika Hrvatska  
Telefon: 099 / 285-0096  
E-mail: [blanka.krcelic53@gmail.com](mailto:blanka.krcelic53@gmail.com)

## Obrazovanje:

2019. - sada: student diplomskog studija Metalurgija na Metalurškom fakultetu u Sisku  
2015. - 2019.: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, preddiplomski studij Metalurgija, smjer: Industrijska ekologija (univ.bacc.ing.met.).  
2010. - 2015.: Srednja škola u Petrinji, smjer: Opća gimnazija  
2002. - 2010.: Prva osnovna škola Petrinja, Petrinja

## Radno iskustvo:

rad preko student servisa (Pogrebni centar Panić 2018-2023)

## Dodatna znanja i vještine:

- aktivno i svakodnevno korištenje MS Office paketa,
- B2 kategorija engleskog jezika,
- B1 kategorija njemačkog jezika,
- B kategorija vozačke dozvola.