

# Utjecaj sabijanja na tvrdoću čelika

---

Šimić, Klara

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:115:193512>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-01**



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

Klara Šimić

DIPLOMSKI RAD

Sisak, prosinac 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Klara Šimić

UTJECAJ SABIJANJA NA TVRDOĆU 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 Jandrlić - član  
prof. dr. sc. Ladislav Lazić - zamjenski član

Sisak, prosinac 2022.

IME: Klara  
PREZIME: Šimić  
MATIČNI BROJ: M-108/20

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 SABIJANJA NA TVRDOĆU ČELIKA**

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

Sisak, 1.12.2022.

(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**

*Ovim putem se zahvaljujem svima koji su svojim savjetima i prijedlozima pomogli u izradi ovog rada a posebna zahvala ide mojoj voditeljici izv.prof.dr.sc. Martini Lovrenić-Jugović. Za provedbu eksperimentalnog dijela istraživanja zahvaljujem se Željku Grubišiću, mag.ing.met., a za provedbu metalografske analize Franji Kozini, mag.ing.met. Posebno se želim zahvaliti mojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom studiranja.*

## SAŽETAK

### UTJECAJ SABIJANJA NA TVRDOĆU ČELIKA

Ovaj diplomski rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu obrađeni su mehanizmi očvrnuća metalnih materijala, s posebnim naglaskom na proces deformiranja hladnim sabijanjem. Dane su teorijske osnove provođenja statičkog vlačnog testa, mjerenja tvrdoće Vickersovom metodom te primjene metode konačnih elemenata za numeričku simulaciju sabijanja. U eksperimentalnom dijelu rada na čeliku za poboljšavanje 42CrMo4 (Č.4732) valjkastog oblika proveden je eksperiment sabijanja na hidrauličkoj preši s različitim iznosima opterećenja od: 8t, 14t, 20t i 24t. Nakon provedenog eksperimenta na sabijenim uzorcima provela se metalografska analiza te izmjerila tvrdoća Vickersovom metodom po uzdužnom presjeku sabijenih valjaka. Također je provedena nelinearna numerička simulacija sabijanja valjka s karakteristikama materijala dobivenim iz statičkog vlačnog testa. Izmjerene vrijednosti tvrdoće povećavaju se sa stupnjem sabijanja što ukazuje na pojavu očvrnuća materijala. Provedena je i usporedba rezultata naprezanja dobivenih numeričkom simulacijom s rezultatima izmjerenih tvrdoća i metalografskih snimaka mikrostrukture, na kojima se jasno uočavaju zone deformacija prilikom sabijanja.

**Ključne riječi:** sabijanje, čelik za poboljšavanje, tvrdoća, metalografska analiza, numerička simulacija

## SUMMARY

### INFLUENCE OF COMPRESSION ON HARDNESS STEEL

This master's thesis consists of a theoretical and an experimental part. In the theoretical part, the mechanisms of strengthening metallic materials are discussed, with special emphasis on the process of deformation by cold compression. The theoretical basis of conducting a static tensile test, hardness measurement using the Vickers method, and the application of the finite element method for numerical simulation of compaction are given. In the experimental part of the paper on the hardening steel 42CrMo4 (Č.4732) cylindrical shape, a compression experiment was carried out on a hydraulic press with different load amounts: 8t, 14t, 20t, and 24t. After the experiment on the compressed samples, a metallographic analysis was carried out and the hardness was measured by the Vickers method on the longitudinal section of the compressed cylinders. A non-linear numerical simulation of the compressed cylinder with material characteristics obtained from a static tensile test was also performed. The measured hardness values increase with the degree of deformation, which indicates the occurrence of material strengthening. A comparison of the stress results obtained by numerical simulation with the results of measured hardnesses and metallographic images of the microstructure, where deformation zones during compression are clearly observed, was also carried out.

**Keywords:** compression, hardening steel, hardness, metallographic analysis, numerical simulation

## SADRŽAJ:

POPIS SIMBOLA I KRATICA .....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	IV
1.UVOD .....	1
2.TEORIJSKI DIO.....	2
2.1.Mehanizmi očvrnuća metalnih materijala .....	2
2.2.Hladna deformacija sabijanja.....	4
2.3.Statički vlačni pokus .....	6
2.4.Stvarna naprezanja i deformacije pri kompresiji .....	9
2.5.Numerička simulacija .....	10
2.5.1. Elementi za analizu 3D problema .....	11
2.5.2. Korišteni konačni elementi u Autodesk Inventor Nastran programu.....	12
2.6.Mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu .....	12
2.7.Opći odnos između čvrstoće i tvrdoće .....	15
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	16
3.1.Čelik za poboljšavanje .....	16
3.2.Eksperiment sabijanja .....	17
3.3.Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu.....	18
3.4.Mjerenje tvrdoće .....	24
3.5.Statički vlačni pokus .....	25
3.6.Postupak predprocesiranja za numeričku simulaciju .....	27
4.REZULTATI I RASPRAVA .....	30
4.1.Metalografska analiza .....	30
4.2.Statički vlačni test .....	35
4.3.Numerička analiza .....	37
4.4.Izmjerene vrijednosti tvrdoće .....	38
4.5.Povezivanje rezultata .....	45
5.ZAKLJUČAK .....	48
6.LITERATURA.....	49
ŽIVOTOPIS .....	51

## POPIS SIMBOLA I KRATICA

- $A$  - istezljivost, postotak (%)  
 $A_t$  - ukupna istezljivost, postotak (%)  
 $a$  - debljina plosnate epruvete, milimetar (mm)  
 $b$  - širina plosnate epruvete, milimetar (mm)  
 $CW$  - mjera plastične deformacije, postotak (%)  
 $d$  - promjer, milimetar (mm)  
 $d_0$  - početni promjer epruvete, milimetar (mm)  
 $d_1$  - dijagonala otiska, milimetar (mm)  
 $d_2$  - dijagonala otiska, milimetar (mm)  
 $E$  - modul elastičnosti, megapaskal (MPa)  
 $E_{tan}$  - tangenti modul elastičnosti, megapaskal (MPa)  
 $F$  - sila, Newton (N)  
 $F_m$  - maksimalna sila, Newton (N)  
 $g_n$  - ubrzanje zemljine sile teže  
 $h$  - duljina "glave" epruvete, milimetar (mm)  
 $h$  - visina sabijenog valjka, milimetar (mm)  
 $HV$  - tvrdoća po Vickersu  
 $k$  - konstanta koja je recipročna vrijednost ubrzanja zemljine sile teže ( $g_n$ )  
 $L_0$  - početna mjerna duljina epruvete, milimetar (mm)  
 $L_t$  - ukupna duljina epruvete, milimetar (mm)  
 $L_U$  - mjerna duljina nakon loma, milimetar (mm)  
 $\Delta L$  - trenutno istezanje, milimetar (mm)  
 $\Delta L$  - ukupno produljenje epruvete, milimetar (mm)  
 $p$  - tlak na manometru, (bar)  
 $R^2$  - koeficijent determinacije  
 $R_e$  - granica popuštanja (tečenja), megapaskal (MPa)  
 $R_k$  - konačno naprezanje, megapaskal (MPa)  
 $R_m$  - vlačna čvrstoća, megapaskal (MPa)  
 $R_{p0.2}$  - konvencionalna granica popuštanja (tečenja), megapaskal (MPa)  
 $S$  - površina, milimetar kvadratni ( $mm^2$ )  
 $S_0$  - površina početnog presjeka epruvete, milimetar kvadratni ( $mm^2$ )  
 $S_d$  - površina nakon deformiranja, milimetar kvadratni ( $mm^2$ )  
 $\sigma$  - naprezanje, megapaskal (MPa)  
 $\sigma_{true}$  - stvarno naprezanje, megapaskal (MPa)  
 $\varepsilon$  - deformacija  
 $\varepsilon_{true}$  - stvarna deformacija  
 $\varepsilon_r$  - relativni stupanj deformacije (redukcije), postotak (%)



## POPIS SLIKA

- Slika 1. Utjecaj %CW (hladnog deformiranja): a) na naprezanje i deformaciju za niskougljični čelik [8], b) na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i veličinu zrna
- Slika 2. Prikaz slobodnog sabijanja valjka: a) polazni oblik, b) realni oblik sabijenog tijela, c) idealni oblik sabijenog tijela [1]
- Slika 3. Stvaranje deformacijskih zona kod sabijanja [1]
- Slika 4. Univerzalna kidalica i njezine komponente
- Slika 5. Epruvete za statički vlačni pokus prema DIN 50115: a) okrugla epruveta b) plosnata epruveta [9]
- Slika 6. Dijagram  $F-\Delta L$  i  $\sigma-\varepsilon$  za niskougljični čelik [11]
- Slika 7. Shematski prikaz računalnog programa [18]
- Slika 8. Često korišteni 3D elementi [17]
- Slika 9. Konačni tetraedarski element [16]
- Slika 10. Tvrdomjer i njegove komponente [20]
- Slika 11. a) Vickers-ov dijamantni stožac s vršnim kutom od  $136^\circ$  b) shema geometrije indentora [21]
- Slika 12. Utiskivanje indentora [22]
- Slika 13. Dimenzije početnog valjčića
- Slika 14. Korištena hidraulična preša
- Slika 15. Sabijanje trećeg uzorka
- Slika 16. Uzorci nakon sabijanja
- Slika 17. a) način rezanja uzorka, b) rezalica Buehler ABRASIMET
- Slika 18. Postavljanje uzorka u stege: a) pogled odozdo, b) pogled s lijeva
- Slika 19. Prerezani uzorci
- Slika 20. a) uređaj za vruće izostatsko prešanje (Buehler SimpliMet 1000), b) postavljanje razrezanog uzorka u uređaj
- Slika 21. Uzorci nakon prešanja u vodljivu masu
- Slika 22. Uređaj za brušenje i poliranje "BUEHLER Phoenix Beta"
- Slika 23. Postupak: a) brušenja uzoraka, b) poliranja uzoraka
- Slika 24. Metalografski svjetlosni mikroskop Leica Ortholux
- Slika 25. Ispolirani i očišćeni uzorci
- Slika 26. Nagrizanje nital-om
- Slika 27. Invertni metalografski mikroskop Olyimpus GX51 s digitalnom kamerom DP70
- Slika 28. Uređaj Mituyoto
- Slika 29. Mjerenje dijagonala otiska
- Slika 30. Područja mjerenja tvrdoće sabijanih uzoraka
- Slika 31. Statička kidalica Inspekt table 100 kN
- Slika 32. Dimenzije ispitne epruvete
- Slika 33. Ispitivane epruvete
- Slika 34. Kontaktni ekstenzometar
- Slika 35. Statički vlačni pokus
- Slika 36. Geometrija  $\frac{1}{4}$  valjka
- Slika 37. Odabrana vrsta analize
- Slika 38. Unos parametara materijala
- Slika 39. Cilindrični koordinatni sustav s tetraedarskom mrežom konačnih elemenata
- Slika 40. Postavljeni rubni uvjeti
- Slika 41. Definiranje opterećenja
- Slika 42. Metalografski snimci uzoraka: a) 0, b) 1, c) 2, d) 3 i e) 4, na sredini uzdužnog presjeka pri povećanju od 50 X

- Slika 43. Metalografski snimci uzoraka: a) 0, b) 1, c) 2, d) 3 i e) 4, na sredini uzdužnog presjeka pri povećanju od 200 X
- Slika 44. Metalografski snimci uzorka 4 pri povećanju 200 X
- Slika 45. Metalografski snimci uzorka 4 nakon nagrizanja nitalom pri povećanju 200 X
- Slika 46. Metalografski snimci donjih kuteva uzorka 4, bez nagrizanja pri povećanju od 50 X
- Slika 47. Inženjerska ovisnost naprezanja o deformaciji nakon statičkog vlačnog testa
- Slika 48. Ovisnost naprezanja o deformaciji inženjerska vlačna (ENG) i stvarna tlačna (TRUE)
- Slika 49. Linearna aproksimacija materijalnog modela od granice popuštanja do vlačne čvrstoće
- Slika 50. Rezultati naprezanja
- Slika 51. Uzdužni presjek sabijenog uzorka s naznačenim položajima utiskivanja
- Slika 52. Shema prikaza visine i radijusa svakog uzdužnog presjeka uzorka
- Slika 53. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1
- Slika 54. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2
- Slika 55. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3
- Slika 56. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4
- Slika 57. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća na sredini uzoraka (položaj 9) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju
- Slika 58. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća u vrhovima uzoraka (položaj 2, 4, 6 i 8) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju
- Slika 59. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća na vanjskom radijusu na polovini visine uzorka (položaj 3 i 7) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju
- Slika 60. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća na središnjici gornje i donje baze uzorka (položaj 1 i 5) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju
- Slika 61. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća uzorka o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju
- Slika 62. Usporedba teorije slobodnog sabijanja i rezultata tvrdoće
- Slika 63. Usporedba teorije slobodnog sabijanja i rezultata naprezanja numeričke simulacije
- Slika 64. Usporedba rezultata naprezanja numeričke simulacije i metalografske analize
- Slika 65. Ovisnost graničnih naprezanja ( $R_m$  i  $R_{p0.2}$ ), izračunatih pomoću izmjerene tvrdoće) o stupnju deformacije

## POPIS TABLICA

- Tablica 1. Primjenjena sila i potrebna oznaka uz izmjerenu tvrdoću metodom po Vickersu [23]
- Tablica 2. Kemijski sastav čelika 42CrMo4 (Č.4732) u % prema standardu EN 10083-3:2006
- Tablica 3. Podaci eksperimenta sabijanja
- Tablica 4. Parametri brušenja i poliranja uzoraka čelika (HRN Č.4732) uložениh u masu
- Tablica 5. Mehaničke karakteristike materijala
- Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 0
- Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1
- Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2
- Tablica 9. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3
- Tablica 10. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4
- Tablica 11. Omjeri tvrdoće i granica čvrstoće ( $HV/R_{p0.2}$  i  $HV/R_m$ ) za uzorak 0
- Tablica 12. Izračunate vrijednosti naprežanja na osnovu dobivenih omjera za uzorak 0

# 1. UVOD

Najstariji način oblikovanja metala i njihovih legura jest oblikovanje metala deformiranjem koje se provodi s ciljem izmjene oblika i dimenzija proizvoda koji pri tome ostvaruju odgovarajuća fizička i mehanička svojstva. Ovim postupcima se danas prerađuje preko ukupno 85 % proizvedenog čelika i preko 90 % obojenih metala i njihovih legura [1].

Skoro sve metale i njihove legure možemo oblikovati deformiranjem. Neki metali imaju visok stupanj plastičnosti i mogu se dobro valjati, prešati, kovati i izvlačiti u hladnom stanju. Pri navedenim postupcima dolazi do očvrnuća materijala. Očvrnuće hladnom deformacijom nastaje zbog umnažanja dislokacija u kristalnoj strukturi pri čemu se one isprepleću. Novo unešene dislokacije postojećima otežavaju gibanje time otežavaju plastično tečenje materijala [2-4].

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]. Povećanje čvrstoće čelika može se postići različitim mehanizmima, a u ovom radu primjenjen je mehanizam očvrnuća hladnim deformiranjem ostvaren slobodnim sabijanjem. Postupak slobodnog sabijanja 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) [5].

U ovom diplomskom radu proveden je eksperiment prešanja valjkastih uzoraka čelika za poboljšavanje 42CrMo4 (Č.4732) pri različitim opterećenjima što rezultira različitim stupnjevima deformacije. Cilj ovog diplomskog rada je pomoću tvrdomjera izmjeriti tvrdoću metodom po Vickersu svakog sabijenog uzorka i promjenu prikazati u ovisnosti o stupnju deformacije. S obzirom da je tvrdoća proporcionalno povezana s čvrstoćom, moći će se zaključiti dolazi li povećanjem stupnja deformacije sabijanjem do očvrnuća materijala. U radu je provedena i metalografska analiza mikrostrukture koja se povezala s izmjerenim tvrdoćama. Također je provedena i numerička simulacija sabijanja metodom konačnih elemenata u edukacijskoj verziji programa Autodesk Inventor Nastran, koja je dodatno potvrdila zone deformacije.

## 2. TEORIJSKI DIO

Deformacija podrazumijeva pomake čestica i dijelova iz početne pozicije uz uvjet da se ne narušava kontinuitet i funkcionalnost tijela. Elastična deformacija sastoji se od pomicanja atoma iz ravnotežnog položaja što povećava potencijalnu energiju unutar tijela. Napregnuto stanje tijela označava nastojanje da se atomi vrate u početno stanje. Elastična deformacija odvija se ako naprezanje ne pređe granicu elastičnosti. Plastična deformacija uzrokuje trajnu promjenu oblika i pozicija strukturalnih dijelova u odnosu na prvobitni oblik. Do deformacije, odnosno izmjene početnih dimenzija nekog tijela dolazi djelovanjem vanjskih sila na to tijelo. Veličina tih sila utječe na to hoće li doći do elastične ili plastične deformacije. Do plastične deformacije dolazi kad promatrano tijelo nakon što prestanu djelovati vanjske sile dobije novi oblik [6].

Poznavanje temeljnih zakona po kojima se odvijaju procesi oblikovanja deformiranjem omogućuje evaluaciju postupka deformacije koji se odvija u materijalu. Temeljni zakoni koji se koriste u procesima oblikovanja deformiranjem su:

1. Zakon o konstantnosti volumena: volumen proizvoda na početku i na kraju deformacije je identičan;
2. Zakon najmanjeg otpora: ako postoji mogućnost tečenja materijala u različitim pravcima, točka deformiranog tijela uvijek će težiti smjeru najnižeg otpora;
3. Zakon sličnosti i modeliranje procesa oblikovanja deformiranjem: temelji se na poznavanju i povezivanju sila deformacije, rada i raspodjele naprezanja u zoni deformacije. Isključivo teorijskom analizom nije moguće doći do određenih veličina zato se provode eksperimentalna istraživanja na određenim proizvodima u definiranim uvjetima;
4. Zakon neravnomjerne deformacije i zaostalih naprezanja: ravnomjerna deformacija se, u realnim uvjetima, ne ostvaruje tijekom provođenja procesa oblikovanja deformiranjem, a kao posljedica toga su naprezanja koja ostaju u deformiranom tijelu nakon prekida djelovanja sile (zaostala naprezanja) [1].

### 2.1. Mehanizmi očvrnuća 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. Pri tome bi bilo omogućeno gibanje nekih dislokacija kako bi se održala dovoljna istezljivost.

Kemijski sastav u kombinaciji s određenom termomehaničkom obradom daje ciljanu mikrostrukturu čelika koja pokazuje određena mehanička svojstva. Ako se traži materijal određenih mehaničkih svojstava, mora se promijeniti njegova mikrostruktura, a za mjenjanje mikrostrukture potrebno je promijeniti proces termomehaničke obrade.

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 oblikovljivost [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, povisuje 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 izvor dislokacije vraća u prvobitno stanje pa zbog nametnutog naprezanja može ponovo stvoriti novu dislokaciju [7].

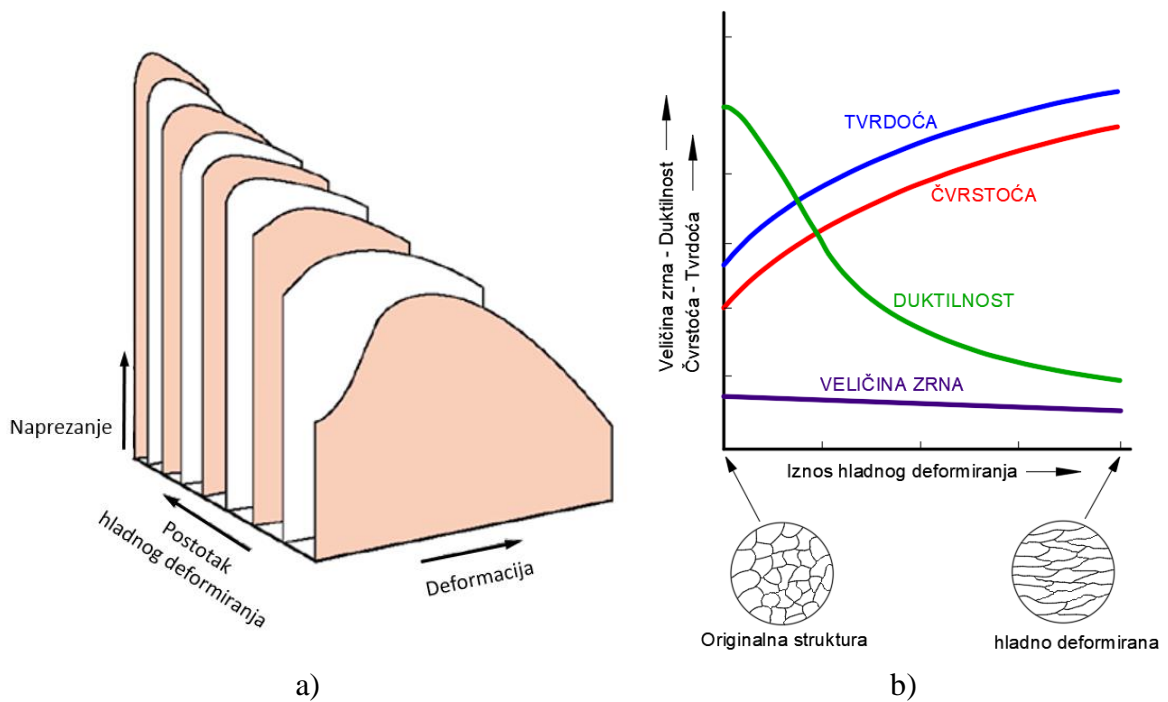
Tečenje materijala koje je započelo pri nekom određenom naprezanju ne nastavlja se ako to naprezanje ostaje konstantno. Za povećanje deformacije potrebno je stalno rastuće naprezanje.

U početnom stadiju oblikovanja deformiranjem izvori dislokacija aktivirani napreznjem 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 očvršnuća izražava se stupnjem plastične deformacije

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

gdje je  $S_o$  početna površina presjeka, a  $S_d$  površina nakon deformiranja, %CW je samo još jedna mjera plastične deformacije. Na slici 1a prikazan je utjecaj povećanja stupnja plastične deformacije ostvarenog hladnim deformiranjem na naprezanje i deformaciju za niskougljični čelik. Na slici 1b prikazan je utjecaj stupnja deformacije na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i veličinu zrna.



Slika 1. Utjecaj %CW (hladnog deformiranja): a) na naprezanje i deformaciju za niskougljični čelik [8], b) na tvrdoću, čvrstoću, duktilnost i veličinu zrna

Iz slike 1 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.

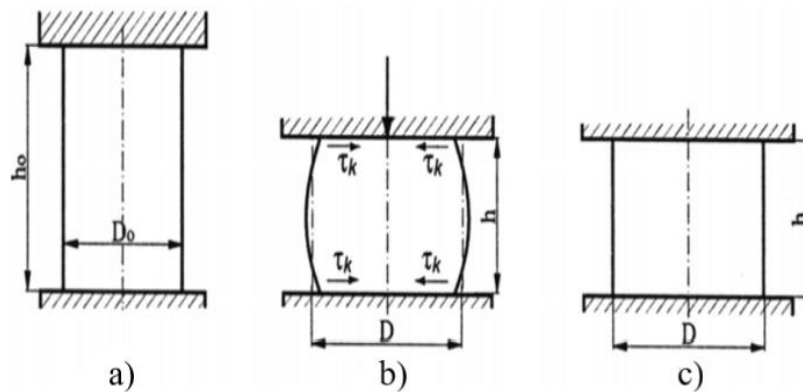
## 2.2. Hladna deformacija sabijanja

Gotovo sve metale i njihove legure moguće je oblikovati plastičnom deformacijom. Neki metali imaju veliki stupanj plastičnosti te se mogu dobro valjati, kovati, prešati i duboko izvlačiti.

Željezne legure s udjelom ugljika do 2.06 % mogu se oblikovati plastičnom deformacijom i zovu se čelici, dok se željezne legure s udjelom ugljika od 2.06 do 4.5 % ubrajaju u željeza koja se mogu dobro oblikovati uglavnom lijevanjem. Ako se analizira sposobnost čelika za oblikovanje plastičnom deformacijom, tada treba posebno razmotriti podeutektoidne perlitne čelike kao i feritne, austenitne i martenzitne. U perlitne čelike spadaju podeutektoidni ugljični čelici i nisko legirani čelici kod kojih legirajući elementi znatno ne mijenjaju izgled Fe - Fe<sub>3</sub>C dijagrama. Ovisno o udjelu ugljika, perlitni čelici imaju dobru plastičnost. U perlitnim čelicima povećanje ugljika za 0.1 % povećava vlačnu čvrstoću za 90 MPa, granicu razvlačenja za 45 MPa a tvrdoću za 7.3 % dok se povećanjem sadržaja ugljika smanjuje deformabilnost čelika.

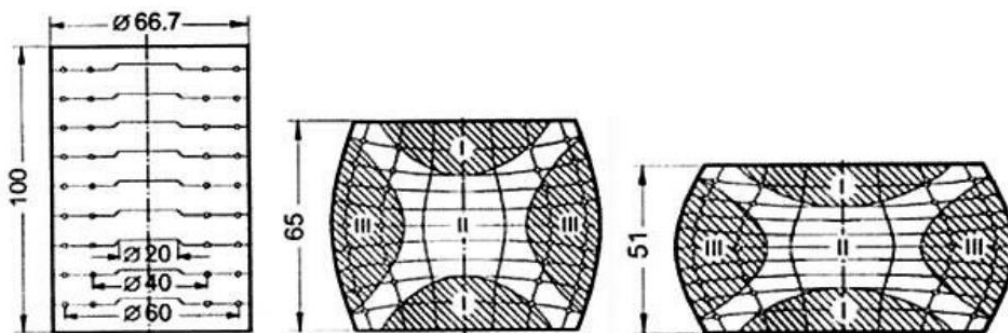
Plastična deformacija temeljni je postupak koji se veže uz oblikovanje metala deformiranjem te ona nastupa nakon što djelovanje sile na materijal premaši granicu tečenja tog materijala. Uslijed djelovanja vanjskih sila dolazi do promjena dimenzija uzoraka koje se izražavaju stupnjem deformacije.

Sabijanje je tehnološka operacija slobodnog kovanja te se ono javlja kao prva operacija i kod nekih drugih tehnoloških postupaka kao što su kovanje u ukovnjima i istiskivanje. Kod kovanja u ukovnjima i kod istiskivanja, sabijanje se javlja sve dok materijal koji se sabija ne dođe u dodir sa stijenkama gravure ukovnja odnosno sa stijenkama kalupa za istiskivanje. Slobodno sabijanje podrazumijeva postupak kod kojeg se materijal pod utjecajem vanjske sile plastično deformira u ravnini okomitoj na pravac djelujuće sile. Pri tome se u pravcu djelujuće sile smanjuje visina komada, a dimenzije se u ravnini okomitoj na djelujuću silu povećavaju. Prema brzini sabijanja razlikuju se prešanje koje se odvija kod postupnog povećanja sile i kovanje uz djelovanje sile u obliku udaraca. Prilikom sabijanja nekog prizmatičnog tijela između paralelnih ravnina javlja se sila sabijanja u pravcu osi tijela a na bočnim stranicama nema nikakvih sila [5], što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Prikaz slobodnog sabijanja valjka: a) polazni oblik, b) realni oblik sabijenog tijela, c) idealni oblik sabijenog tijela [1]

Uslijed djelovanja vanjskog trenja, između alata i komada koji se sabija, prilikom jačeg sabijanja relativno visokih uzoraka stvara se ispupčenje komada u blizini pritisnih ploha. Kod komada čija visina znatno ne prelazi širinu stvara se ispupčenje po sredini bočnih stranica. Tok materijala pri sabijanju uzorka čija visina znatno ne prelazi njegovu širinu prikazan je na slici 3. Na pritisnim površinama javlja se zona otežanog toka materijala (I) koja postepeno prelazi u glavnu deformacijsku zonu (II), tako da sabijanje postepeno prodire od pritisnih površina prema centru uzorka. Bočne zone (III) postižu srazmjerno jednoliko sabijanje preko cijele visine [5].



Slika 3. Stvaranje deformacijskih zona kod sabijanja [1]

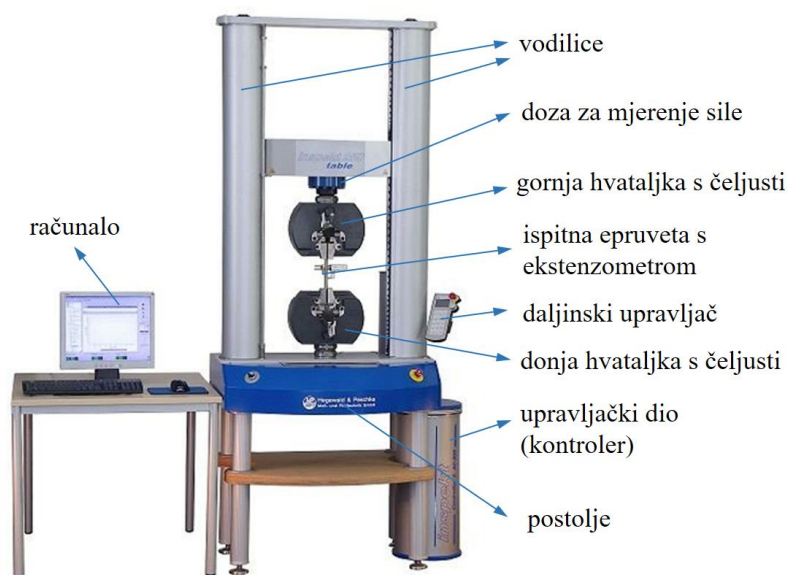


Sabijanje čine tri deformacije; jedna u pravcu aktivne sile koja je negativna i dvije koje su okomite na taj pravac i pozitivne. Te dvije deformacije mogu biti jednake ili jedna od njih može biti jednaka nuli. Kad nema trenja na kontaktnim plohama, shema glavnog naprezanja pri sabijanju jednaka je shemi jednoosnog naprezanja. U suprotnom se pojavljuje neravnomjerno stanje naprezanja. Sabijanje se može provoditi:

- između paralelnih površina – prešanjem
- između cilindričnih radnih površina – valjanjem
- između nagnutih radnih površina – izvlačenjem [1].

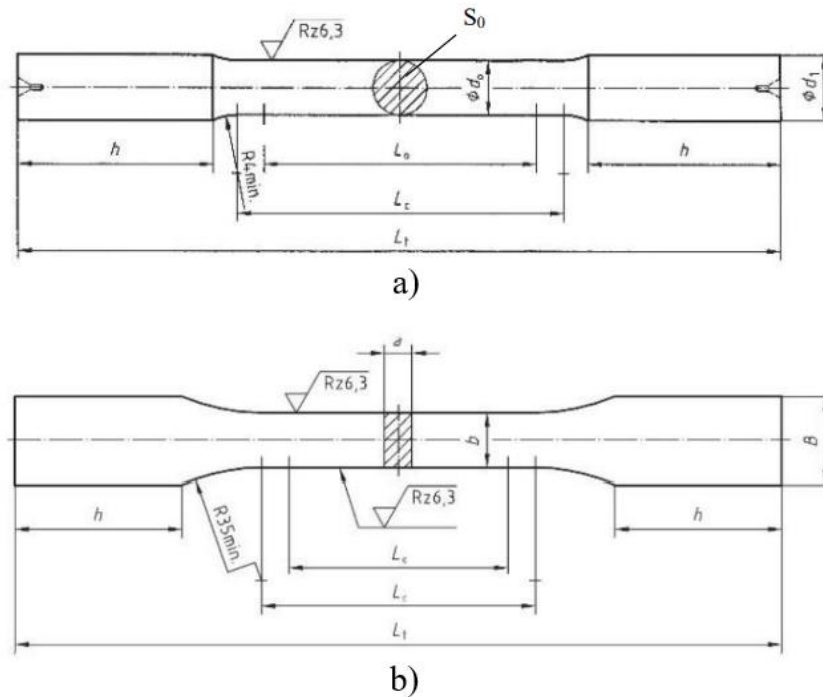
### 2.3. Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus jedna je od osnovnih metoda ispitivanja za određivanje mehaničkih svojstava metalnih i nemetalnih materijala. Test se odvija primjenom jednoosnog vlačnog naprezanja uz relativno male brzine. Prirast sile pri statičkom vlačnom tesu u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude  $\leq 10 \text{ N/mm}^2$  u sekundi. Za takvo sporo opterećivanje najprikladniji je hidraulični pogon kidalice kod kojeg je moguće u svakom trenutku rasteretiti ispitni uzorak [9-11]. Stroj za vlačno ispitivanje (univerzalna kidalica) sa svojim komponentama prikazana je na slici 4.



Slika 4. Univerzalna kidalica i njezine komponente

Strojevi za vlačno ispitivanje obično imaju uređaj za neposredno crtanje dijagrama s koordinatama sila-trenutno istežanje. Nedostatak takvog dijagrama je ovisnost od dimenzija ispitnog uzorka. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima – epruvetama, okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Na slici 5 prikazana je okrugla (a) i plosnata (b) epruveta za statički vlačni pokus prema DIN 50115 [9-11].



Slika 5. Epruvete za statički vlačni pokus prema DIN 50115: a) okrugla epruveta b) plosnata epruveta [9]

Oznake na slici 5 znače:

- $d_0$  - početni promjer epruvete, mm;
- $L_0$  - početna mjerna duljina epruvete, mm;
- $h$  - duljina "glave" epruvete, mm;
- $L_t$  - ukupna duljina epruvete, mm;
- $a$  - debljina plosnate epruvete, mm;
- $b$  - širina plosnate epruvete, mm;
- $B$  - širina glave plosnate epruvete, mm;
- $S_0$  - površina početnog presjeka epruvete, mm<sup>2</sup>.

Površina početnog presjeka okrugle epruvete iznosi [9]:

$$S_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}, \text{ mm}^2$$

Pri vlačnom ispitivanju ispitni se uzorak izlaže vlačnom opterećenju sve do loma i utvrđuju se svojstva otpornosti i svojstva deformacije. Pregledno predstavljanje tijeka ponašanja materijala pri vlačnom ispitivanju provodi se snimanjem dijagrama s koordinatama:

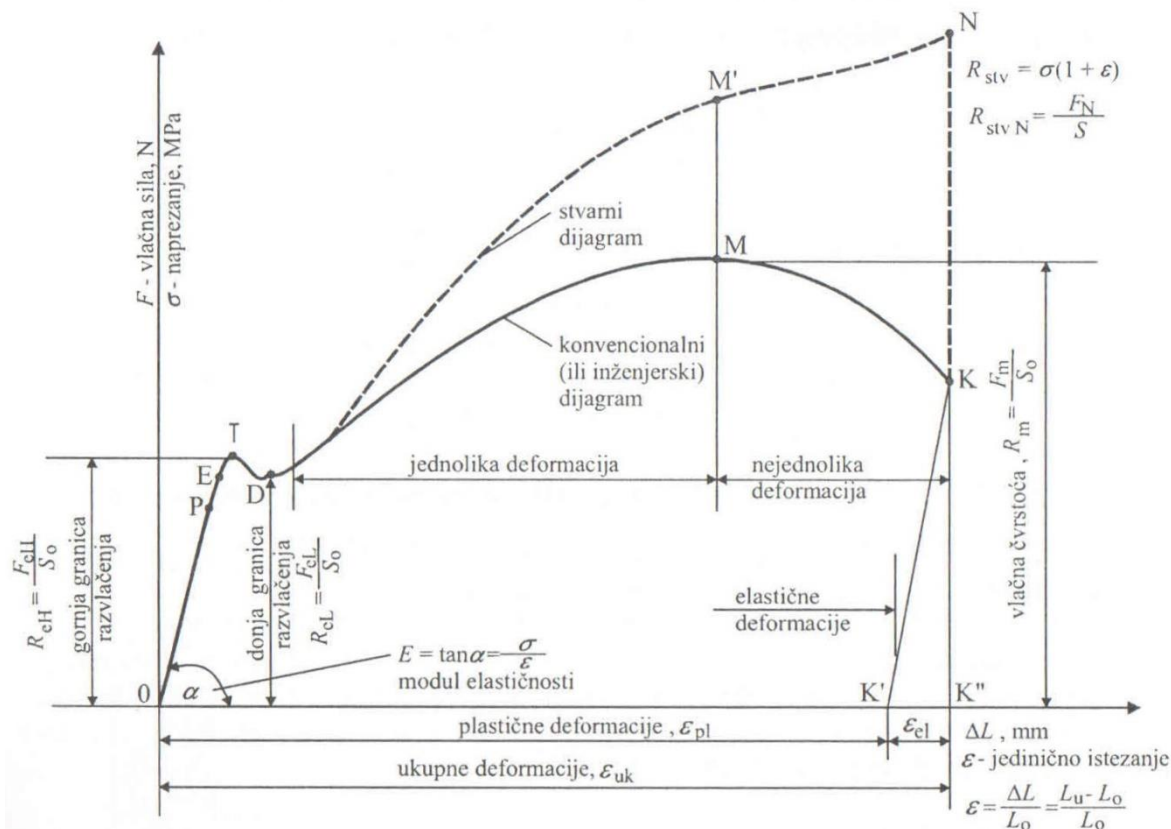
1.  $F-\Delta L$ , tj. na ordinati sila  $F$  u N, a na apscisi trenutno istežanje  $\Delta L$  u mm ili:
2.  $\sigma-\varepsilon$ , tj. na ordinate naprežanje u MPa, a na apscisi jedinično istežanje u  $\varepsilon = \Delta L / L_0$ .

Točnije je korištenje dijagrama s koordinatama  $\sigma-\varepsilon$  (naprežanje-jedinično istežanje), koji pokazuje ponašanje materijala neovisno o dimenzijama ispitnog uzorka u kojem je sila svedena na prvobitni presjek, a trenutno istežanje na početnu mjernu duljinu što je prikazano sljedećim izrazima:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \text{ MPa,}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_t - L_0}{L_0}$$

Na slici 6 dan je detaljno prikazan dijagram  $F-\Delta L$  i  $\sigma-\varepsilon$  (konvencionalni i stvarni - crtkana linija) sa svim važnim točkama.



Slika 6. Dijagram  $F-\Delta L$  i  $\sigma-\varepsilon$  za niskouglični čelik [11]

Prikazani dijagram pripada dijagramu s izraženom granicom razvlačenja (gornjom i donjom)  $\sigma-\varepsilon$ . Na njemu je označeno nekoliko karakterističnih točaka važnih za definiranje svojstava materijala koja se određuju pri vlačnom ispitivanju.

Provođenjem ovog ispitivanja dobivaju se mehanička svojstva koja karakteriziraju otpornost i deformabilnost materijala. Mehanička svojstva koja karakteriziraju otpornost materijala su: vlačna čvrstoća ( $R_m$ ), granica razvlačenja ( $R_e$ ) i konačno naprezanje ( $R_k$ ). Mehanička svojstva koja karakteriziraju deformabilnost materijala su: istezljivost ( $A$ ), ukupno produljenje epruvete ( $\Delta L$ ) [12]. Svojstvo koje povezuje otpornost i deformabilnost materijala je modul elastičnosti ( $E$ ).

Vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) omjer je maksimalne sile postignute pri statičkom vlačnom ispitivanju i površine početnog presjeka ispitnog uzorka [13]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

gdje je:  $F_m$  – maksimalna sila, N  
 $S_0$  – površina početnog presjeka,  $\text{mm}^2$ .

Granica razvlačenja ( $R_e$ ) jedan je od osnovnih pokazatelja mehaničke otpornosti materijala. Dostizanjem tog naprezanja u materijalu započinje pojava plastične deformacije.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

gdje je:  $F_e$  – sila, N  
 $S_0$  – površina početnog presjeka,  $\text{mm}^2$ .

Modul elastičnosti utvrđuje se sljedećim izrazom:

$$E = \frac{F}{S_0} \cdot \frac{L_0}{\Delta L}$$

Modul elastičnosti je elastična konstanta materijala čija veličina ovisi o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi. Određuje se u linearnom području dijagrama naprezanje ( $\sigma$ )-deformacija ( $\varepsilon$ ) (tzv. elastično područje) i naziva se Hookeovim pravcem [10]. Modul elastičnosti odnosno Youngov modul elastičnosti ( $E$ ) omjer je naprezanja i istezanja izazvanog tim naprezanjem u području elastičnih deformacija:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Istezljivost ( $A$ ) je definirana izrazom:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

gdje je:  $L_0$  – početna mjerna duljina, mm  
 $L_u$  – mjerna duljina nakon loma, mm.

## 2.4. Stvarna naprezanja i deformacije pri kompresiji

U inženjerskoj praksi, mehanička svojstva materijala obično se opisuju u inženjerskim krivuljama naprezanje-deformacija. Međutim, u konstitutivnom modeliranju i numeričkoj simulaciji, svojstva materijala obično se opisuju pravim krivuljama naprezanje-deformacija. Inženjerske krivulje naprezanje-deformacija izravno se dobivaju eksperimentima pri različitim konstantnim inženjerskim brzinama deformacije koje se koriste za razvoj konstitutivnog odnosa naprezanje-deformacija ovisno o brzini deformacije. Prije određivanja i kalibracije konstanti modela materijala, inženjerska mjerenja moraju se pretvoriti u stvarna mjerenja. Pod jednoosnom kompresijom, prava deformacija,  $\varepsilon_{\text{true}}$ , izračunava se pomoću

$$\varepsilon_{\text{true}} = -\ln(1 - \varepsilon_{\text{eng}})$$

gdje  $\varepsilon_{\text{eng}}$  predstavlja inženjersku deformaciju. Uz pretpostavku da je kruto tijelo nestlačivo, stvarno naprezanje,  $\sigma_{\text{true}}$ , izračunava se kao

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{eng}} (1 - \varepsilon_{\text{eng}})$$

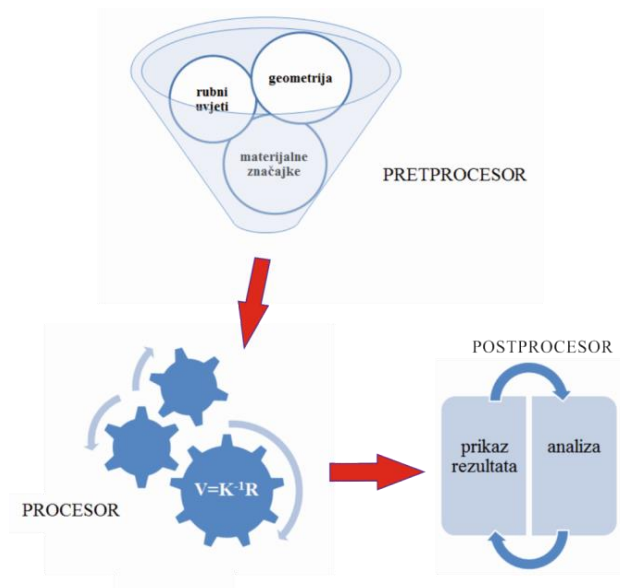
gdje je  $\sigma_{eng}$  inženjersko naprezanje. Pri kompresiji se i naprezanje i deformacija uzimaju kao pozitivni. Stoga se izmjereni inženjerski odgovor na naprezanje i deformaciju može jednostavno pretvoriti u pravu ovisnost naprezanja i deformacije [14].

## 2.5. Numerička simulacija

Numeričkim metodama izračunavaju se približna rješenja diferencijalnih jednadžbi koja su dovoljno točna za inženjersku praksu. Po pravilu su numerička rješenja brža i jeftinija od eksperimentalno dobivenih rezultata stoga je njima moguće zamijeniti mnoga eksperimentalna istraživanja. Točna formulacija numeričkih metoda zajedno s formulacijom matematičkog modela preduvjet je za pouzdanost numeričkih rješenja [15].

Budući da je metoda konačnih elemenata numerička metoda, sva dobivena rješenja su približna, odnosno realnim vrijednostima može se približiti samo uz pravilan odabir proračunskog modela i uz pravilno odabrane tipove konačnih elemenata. Iz tog razloga vrlo je važno poznavati fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te poznavati teorijske osnove konačnih elemenata. Princip metode konačnih elemenata je diskretizacija kontinuuma s beskonačno mnogo stupnjeva slobode gibanja mrežom konačnih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode, odnosno diferencijalne jednadžbe se zamjenjuju sustavom algebarskih jednadžbi. Postoje različiti tipovi konačnih elemenata, ovisno o obliku i nepoznatim parametrima u čvorovima kao što su na primjer štapni elementi, gredni elementi, elementi za dvo- i trodimenzijsku analizu, prstenasti elementi, elementi za savijanje ploča, ljuskasti elementi, itd [16].

Postoji mnogo programskih paketa koji koriste metodu konačnih elemenata no osnovna shema rada, koja je prikazana na slici 7, ne razlikuje se. Programski paket sastoji se od pretprocesora u kojem korisnik definira proračunski model tako da zadaje geometriju, materijalne značajke, rubne uvjete i definira mrežu konačnih elemenata. Procesor je središnji dio paketa i služi za postavljanje i rješavanje globalnog sustava jednadžbi te naknadnog izračunavanja polja traženih fizikalnih veličina. Postprocesor je dio programskog paketa koji omogućuje prikaz i analizu dobivenih rezultata. Metoda konačnih elemenata približna je metoda te je znanje o samoj metodi važno za pravilan opis proračunskog modela u paketu i približavanje točnom rješenju [16,17].



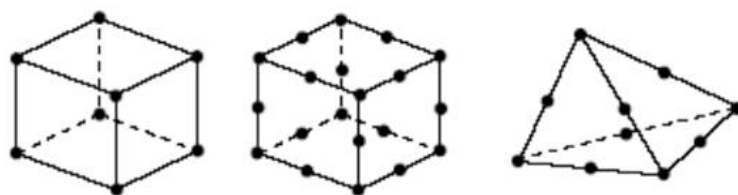
Slika 7. Shematski prikaz računalnog programa [18]

Osnovne pretpostavke, odnosno pravila koje konačni elementi moraju zadovoljiti su sljedeće:

1. Svaki konačni element popunjava pravilno definirano mjesto u prostoru i predstavlja sve relevantne zakone fizike unutar njega. Svaki je element koji zadovoljava ovaj uvjet nezavisan.
2. Dva konačna elementa djeluju jedan na drugi samo preko zajedničkih vrijednosti konačnog skupa varijabli definiranih na zajedničkim granicama.
3. U unutrašnjosti konačnog elementa, odzivne varijable (poput pomaka, naprezanja i deformacije) variraju s obzirom na funkciju odabranu od strane dizajnera konačnog elementa za određenu varijablu.

### 2.5.1. Elementi za analizu 3D problema

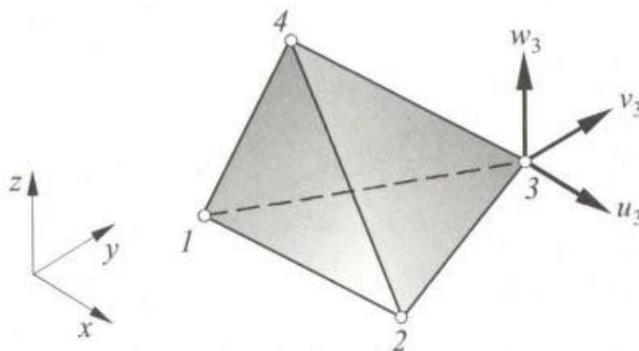
Elementi za analizu čvrstih tijela mogu se iskoristiti za modeliranje dijelova najrazličitije geometrije izložene različitim opterećenjima. Međutim, ovi se elementi koriste kada je geometrija i/ili opterećenje prekompleksno da bi se problem rješavao nekim drugim tipom elemenata s manje prostornih dimenzija, jer je za postizanje iste točnosti kao za jednodimenzijske i dvodimenzijske probleme potreban mnogo veći broj stupnjeva slobode. Ako mreža za rješavanje jednodimenzijskih problema sadrži  $n$  čvorova s jednim stupnjem slobode, za istu razinu točnosti u 2D analizi potrebno je  $n^2$  čvorova s dva stupnja slobode što čini  $2n^2$  stupnjeva slobode. Za istu točnost u 3D analizi potrebno je  $n^3$  čvorova s tri stupnja slobode što daje ukupan broj stupnjeva slobode  $3n^3$  dakle, pri 3D analizi valja računati sa znatno većim brojem nepoznanica što je računalno zahtjevnije. Stupnjevi slobode kod 3D elemenata su 3 translacije u svakom čvoru (1, 2 i 3), dok su kod 2D elemenata aktivni samo stupnjevi slobode 1 i 2. Kod ovih elemenata su izlazne varijable vezane uz globalni Kartezijev koordinatni sustav (default), ali je izlazne varijable moguće vezati uz definirani, lokalni koordinatni sustav [16,17]. Slikom 8 prikazani su često korišteni prizmatični konačni elementi za analizu čvrstih tijela.



Slika 8. Često korišteni 3D elementi [17]

### 2.5.2. Korišteni konačni elementi u Autodesk Inventor Nastran programu

Pošto je u radu korištena edukacijska verzija programskog paketa Autodesk Inventor Nastran, sužena je mogućnost primjene brojnih vrsta konačnih elemenata koju recimo svojim korisnicima pruža programski paket Abaqus. Korišteni programski paket ima mogućnost diskretiziranja geometrije prostornim grednim elementom, tetraedarskim elementom (slika 9) te elementom za analizu ljuskastih konstrukcija.



Slika 9. Konačni tetraedarski element [16]

Najjednostavniji konačni element za trodimenzijsku analizu kontinuuma osnovni je tetraedarski element s 12 stupnjeva slobode. Element se sastoji od 4 čvora u vrhovima tetraedra s po tri komponente pomaka  $u$ ,  $v$ , i  $w$ , u pravcu Kartezijevih koordinatnih osi [16]. Dodavanjem čvorova osnovnom tetraedarskom elementu, izvode se tetraedarski elementi višeg reda.

## 2.6. 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 [13].

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 i kod nje su otklonjeni nedostaci Brinellove metode. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće primjenjuje se za sve vrste metalnih materijala pomoću tvrdomjera prikazanog na slici 10 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 [11,19].



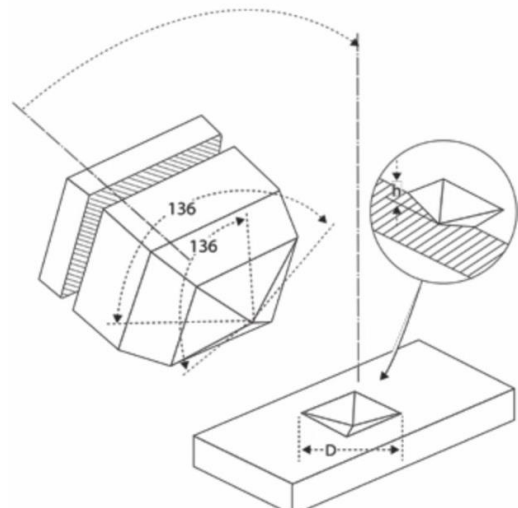
Slika 10. Tvrdomjer i njegove komponente [20]

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 11a, a shema geometrije indentora na slici 11b [13].





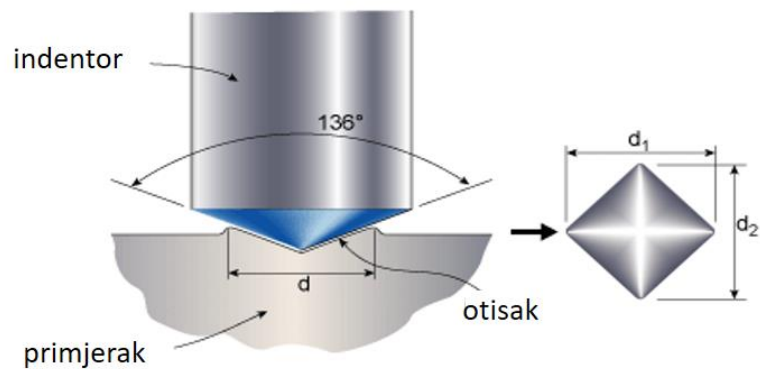
a)



b)

Slika 11. a) Vickers-ov dijamantni stožac s vršnim kutom od  $136^\circ$  b) shema geometrije indentora [21]

Utiskivač (prikazan na slici 11), 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 12.



Slika 12. Utiskivanje indentora [22]

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 upotrebjene sile pritiska) oznaci tvrdoće po Vickersu HV [23].

Tablica 1. Primjenjena sila i potrebna oznaka uz izmjerenu tvrdoću metodom po Vickersu [23]

$F/N$	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 [20]:

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

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 primjenjenih sila te zbog toga što nastali otisak ne oštećuje uzorak funkcionalno [13].

## 2.7. 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 [24] 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:

$$HV \approx 3 \cdot R_m$$

Na kraju provedenog eksperimenta sabijanja prikazani izraz bit će provjeren.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada, sabijani su valjkasti uzorci čelika za poboljšavanje 42CrMo4 (Č.4732) na hidrauličkoj preši pri opterećenjima od: 8t, 14t, 20t i 24t. Svakom sabijenom uzorku izračunat je relativni stupanj deformacije na osnovu njegovih početnih i deformiranih izmjera. Sabijeni valjkasti uzorci najprije su razrezani uzdužno, 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. Kako bi se bolje objasnila različitost izmjerene tvrdoće po uzorku, provedena je i numerička simulacija sabijanja metodom konačnih elemenata u edukacijskoj verziji programa Autodesk Inventor Nastran. 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. Čelik za poboljšavanje

Materijal na kojem je proveden eksperiment sabijanja u ovom radu je čelik za poboljšavanje, HRN Č.4732 (42CrMo4), kemijskog sastava: 0,42% C, 0,65% Mn, 1,05% Cr, 0,22% Mo što odgovara normi prikazanoj u tablici 2. Čelici za poboljšavanje mogu biti nelegirani ili niskolegirani konstrukcijski čelici koji kaljenjem te visokim popuštanjem na temperaturama iznad 500 stupnjeva postižu odgovarajuću granicu razvlačenja, žilavost i vlačnu čvrstoću. Ovi čelici sadrže 0,25-0,60% ugljika koji utječe na njihovu zakaljivost a kaljenje se provodi kako bi se postigla što potpunija martenzitna struktura po presjeku [25].

Tablica 2. Kemijski sastav čelika 42CrMo4 (Č.4732) u % prema standardu EN 10083-3:2006

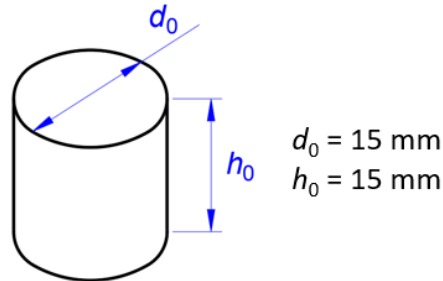
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,380- 0,450	0,150- 0,400	0,500- 0,800	Max. 0,035	Max. 0,035	0,900- 1,200	0,150- 0,300

Visoka čvrstoća proizvoda odnosno njihova visoka granica razvlačenja, žilavost, vlačna čvrstoća te dinamička izdržljivost može se postići odgovarajućim izborom čelika za poboljšavanje i prikladnom provedbom postupka poboljšavanja. Idealna jednoličnost svojstava preko cjelokupnog presjeka proizvoda može postići samo potpunim prokaljivanjem jer se pri visokom popuštanju kaljenog čelika mikrostrukturno mijenjaju martenzit i donji bainit, a ostali mikrostrukturni konstituenti ostaju nepromijenjeni.

Čelik 42CrMo4 popularan je u strojogradnji, a koristi se za izradu dijelova visoke čvrstoće poput kompresora, turbina, radnih elemenata zemaljske i podzemne opreme te dijelova poljoprivrednih strojeva. Ovaj čelik ima nisku zavarljivost zbog visoke osjetljivosti na pukotine [25].

### 3.2. Eksperiment sabijanja

Iz šipke promjera 15 mm čelika za poboljšavanje 42CrMo4 (Č.4732) izrezano je pet valjčića visine 15 mm. Valjkasti uzorak početnih dimenzija  $\phi 15 \times 15$  mm prikazan je na slici 13.



Slika 13. Dimenzije početnog valjčića

Četiri valjčića od njih pet podvrgnuti su sabijanju na hidrauličnoj preši pod različitim opterećenjima. Eksperiment je proveden u svrhu praćenja utjecaja relativnog stupnja sabijanja na tvrdoću sabijenog materijala. Sabijanje je provedeno na hidrauličnoj preši 50t koja je prikazana na slici 14, a sam proces sabijanja trećeg valjčića prikazan je na slici 15.



Slika 14. Korištena hidraulična preša



Slika 15. Sabijanje trećeg uzorka

Svaki valjčić sabijen je hidrauličkom prešom s različitim radnim tlakom očitanim na njegovom manometru i koji se pri svakom sljedećem sabijanju povećavao. Tlak pritiska prvog valjka iznosio je 40 bara, drugog 70 bara, trećeg 100 bara, a četvrtog 120 bara. Na korištenoj hidrauličnoj preši poznata je korelacija da primjena tlaka od 5 bara odgovara opterećenju od 1 t. Sabijanjem je došlo do smanjenja visine, povećanja promjera i poprimanja oblika bačvice, što je prikazano na slici 16.



Slika 16. Uzorci nakon sabijanja

Nakon izmjerenih visina pomičnim mjerilom sabijenih uzoraka pristupilo se izračunu relativnog stupnja deformacije  $\varepsilon_r$ . Relativni stupanj deformacije izračunat je za svaki sabijani uzorak prema jednadžbi:

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

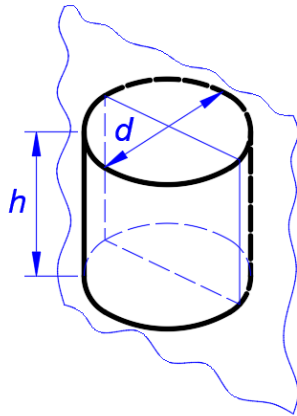
Sve izmjerene i izračunate vrijednosti potrebne za ovaj eksperiment sabijanja prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Podaci eksperimenta sabijanja

Uzorak	Tlak na manometru $p$ , [bar]	Opterećenje $m$ , [t]	Visina sabijenog valjka $h$ , [mm]	Promjer sabijenog valjka $d$ , [mm]	Relativni stupanj deformacije (redukcije) $\varepsilon_r$ , [%]
1	40	8	13,7	16,09	8,7
2	70	14	12,65	16,91	15,7
3	100	20	11,72	17,52	21,9
4	120	24	10,46	18,72	30,3

### 3.3. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu

Priprema uzoraka kreće od rezanja svakog valjčića po visini (slika 17a) rezalicom Buehler ABRASIMET (slika 17b). Rezalica sadrži vertikalnu kružnu pilu, sustav za dovod rashladne tekućine, stege i poklopac. Manipulacija reznom pločom provodi se ručno preko drške. Svaki se uzorak postavlja zasebno na središnji dio točno ispod kružne ploče za rezanje kao što je prikazano na slici 18. 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 sabijeni uzorci prikazani su na slici 19. Uzorak 0 označen na slici 19 je izvorni nesabijeni uzorak, dok su ostali uzorci sabijeni prema tablici 3.



a)



b)

Slika 17. a) način rezanja uzorka, b) rezalica Buehler ABRASIMET

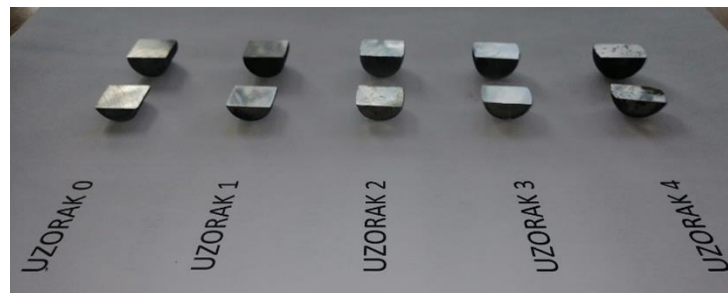


a)



b)

Slika 18. Postavljanje uzorka u stege: a) pogled odozdo, b) pogled s lijeva



Slika 19. Prerezani uzorci

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 20a. Svaki se uzorak postavlja unutar uređaja ravnim rezanim dijelom okrenutim prema dnu kao što je prikazano na slici 20b.



a)



b)

Slika 20. 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 21 prikazani su uzorci nakon ulaganja u vodljivu masu.



Slika 21. 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 22.



Slika 22. Uređaj za brušenje i poliranje "BUEHLER Phoenix Beta"

Uzorci čelika za poboljšavanje brušeni su silom pritiska od 25 N u različitim vremenima. Brušenje je provedeno na brusnim papirima različite gradacije, od grublje do finije (120, 400, 600). 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 kemijskog sastava 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 23a, dok su parametri brušenja prikazani u tablici 4.

Nakon brušenja slijedi proces poliranja na podlozi za poliranje koji se provodi primjenom praha  $\text{Al}_2\text{O}_3$  granulacije  $0.3 \mu\text{m}$  pomiješanog s vodom. Poliranje se provelo pod silom pritiska od 25 N u vremenu od 5 minuta. Postupak poliranja prikazan je na slici 23b, dok su parametri brušenja prikazani u tablici 4.



a)



b)

Slika 23. Postupak: a) brušenja uzoraka, b) poliranja uzoraka



Tablica 4. Parametri brušenja i poliranja uzoraka čelika (HRN Č.4732) uloženi u masu

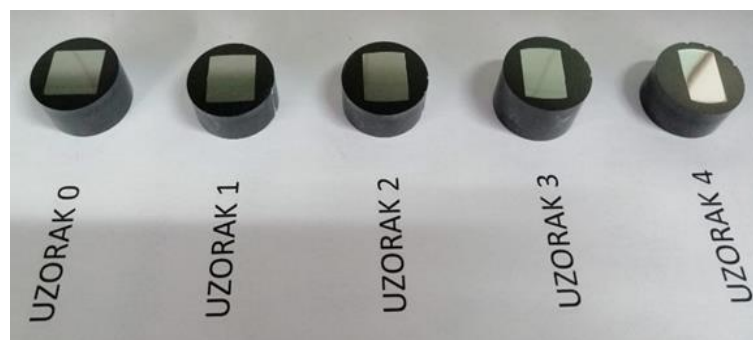
Brušenje					
Podloga	Granulacija zrna	Medij	Brzina rotacije ploče, okr/min	Tlačna sila, N	Vrijeme, min
SiC – papir	120	voda	150	25	2
	400			25	3
	600			25	5
Poliranje					
Podloga	Granulacija zrna	Medij	Brzina rotacije ploče, okr/min	Tlačna sila, N	Vrijeme, min
Tkanina (tzv. filc)	mikrovlakna	voda + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,3μm)	150	25	5

Uzorci su polirani sa svrhom uklanjanja ogrebotina nastalih brušenjem sve dok nije postignuta zrcalna površina uzoraka. Svaka faza brušenja i poliranja kontrolirana je pomoću svjetlosnog mikroskopa prikazanog na slici 24, kako bi se pratio napredak brušenja odnosno poliranja.



Slika 24. 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 25.



Slika 25. 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 ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )). Nagrizenje uzoraka prikazano je na slici 26. Na taj način se uklanjaju slojevi oksida ili nečistoće s površine uzoraka te zrno postaje vidljivo za metalografsku analizu na mikroskopu.



Slika 26. Nagrizenje nital-om

Nakon provedenog nagrizenja provodi se 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 27. Uređaj je opremljen programskim paketom za automatsku obradu slike Analysis Materials Research Lab.



Slika 27. Invertni metalografski mikroskop Olympus GX51 s digitalnom kamerom DP70

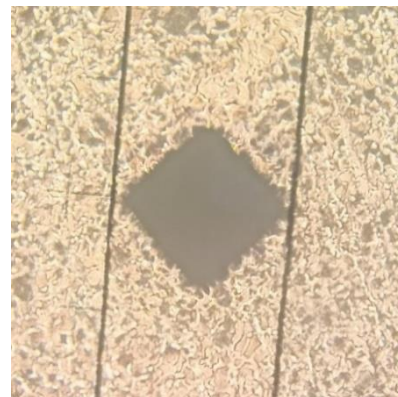
### 3.4. Mjerenje tvrdoće

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 podlogama 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 28. Mjerenja tvrdoće provedena su s opterećenjem od 20 kg što odgovara sili  $F = 196,2 \text{ N}$  u vremenu od 10 sekundi. U teorijskom dijelu objašnjeno je mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu gdje se indentor u obliku četverostrane dijamantne 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 29. Sam uređaj na osnovu izmjerenih dijagonala izračunava površinu utiskivanja.

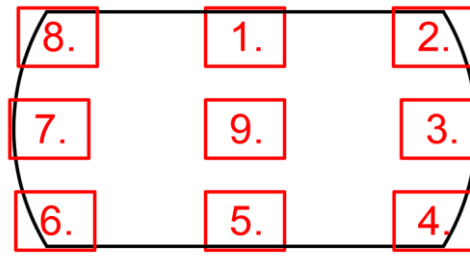


Slika 28. Uređaj Mituyoto



Slika 29. 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 30.



Slika 30. Područja mjerenja tvrdoće sabijanih 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 1 do 9. Na mjestu 1 i 5 mjerena je tvrdoća na gornjem i donjem rubu u sredini gornje i donje baze uzorka. Na mjestima 2, 4, 6 i 8 mjerene su tvrdoće u vrhovima prikazanog presjeka tj. na rubu gornje i donje baze uzorka. Na mjestima 3 i 7 mjerene su tvrdoće na vanjskom radijusu na polovici visine uzorka. Dok mjesto 9 označava izmjerenu vrijednost sredine presjeka valjka. Mjerenja tvrdoće na svakom području provedena su 3-5 puta kako bismo srednjom vrijednošću dobili što precizniji rezultat.

### 3.5. Statički vlačni pokus

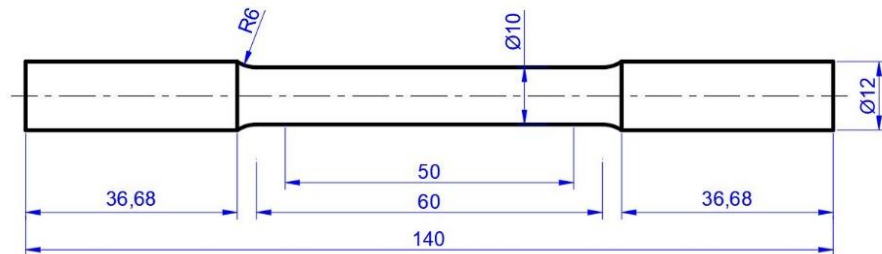
Kako bi mogli provesti numeričku simulaciju sabijanja uzoraka potrebno nam je poznavanje materijalnog modela. Provedbom statičkog vlačnog pokusa doći ćemo do tih podataka.

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja materijala kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava. Ispitivanje materijala provedeno je na statičkoj kidalici Inspekt table 100kN prikazanoj na slici 31.



Slika 31. Statička kidalica Inspekt table 100 kN

Statički vlačni pokus proveden je na epruveti dimenzija prikazanih slici 32 prema normi DIN 50 125 – A10 x 50. Dvije tako pripremljene epruvete ispitane su na kidalici a one su prikazane na slici 33. Na slici se može vidjeti da dio koji je služio za prihvat alata za tokarenje nije odrezan ali to ne smeta u ekperimentu jer je izvan prihвата čeljusti.



Slika 32. Dimenzije ispitne epruvete



Slika 33. Ispitivane epruvete

Prilikom statičkog vlačnog testa pomaci na ispitnom dijelu epruvete pratili su se pomoću kontaktnog ekstenzometra koji je prikazan na slici 34. Kontaktni ekstenzometar postavljen je na početnu duljinu od 50 mm i tijekom vlačnog eksperimenta postavljen je na epruvetu, što je prikazano na slici 35. Eksperiment statičkog vlačnog pokusa na obje epruvete proveden je do loma epruveta.



Slika 34. Kontaktni ekstenzometar



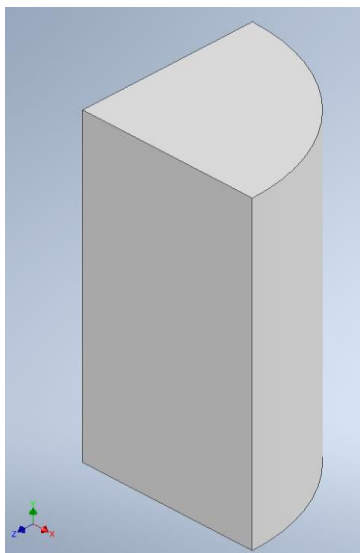
Slika 35. Statički vlačni pokus

### 3.6. Postupak predprocesiranja za numeričku simulaciju

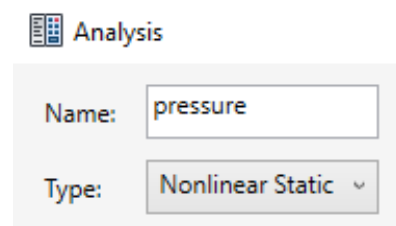
Numeričke simulacije koriste se u predviđanju izlaznih karakteristika procesa deformiranja jer postoje različite fizičke pojave tijekom procesa koje je teško analitički prikazati. Nelinearna analiza procesa sabijanja primjenjena je pomoću metode konačnih elemenata upotrebom programa Autodesk Inventor Nastran. U ovom diplomskom radu korištena je metoda konačnih elemenata s ciljem da se simulira i odredi naprezanje o presjeku valjkastog uzorka. Modeliranje i analize konačnih elemenata poprilično su složene budući da čelik pokazuje nelinearno ponašanje pri velikim deformacijama.

Rješavanje problema metodom konačnih elemenata svodi se na rješavanje sustava algebarskih jednadžbi koje se dobiju pretvaranjem sustava diferencijalnih jednadžbi. Proces modeliranja sastoji se od fizičke diskretizacije kontinuuma na konačne elemente, koji su međusobno povezani čvorovima u mreži. Za svaki konačni element postavljaju se jednadžbe koje opisuju stanje (pomake, deformacije, naprezanja, itd.) u svakom element. Određenim transformacijama, stanja se mogu izračunati za cijeli model. Kao rezultat dobiju se odgovarajuće veličine koje ovise o vrsti problema koji se rješava.

Kreiranje geometrije proračunskog modela provedeno je korištenjem programskog paketa Autodesk Inventor Nastran 2022. S obzirom da je geometrija valjka koji se sabija vrlo jednostavna odlučeno je da će se numerička simulacija provesti na  $\frac{1}{4}$  valjka koristeći njegove dvije ravnine simetrije. Potrebna geometrija prikazana je na slici 36, gdje su ravnine  $xy$  i  $yz$  ravnine njegove simetrije. Nakon modelirane domene pokreće se kartica Autodesk Inventor Nastran u kojoj će biti provedena nelinearna analiza sabijanja koja se mora odabrati, što je prikazano na slici 37.



Slika 36. Geometrija  $\frac{1}{4}$  valjka

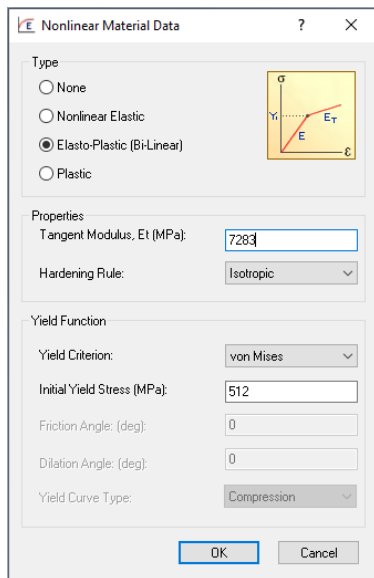


Slika 37. Odabrana vrsta analize

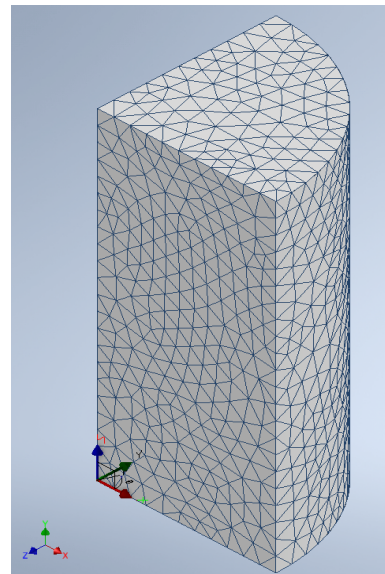
Podaci inženjerske ovisnosti naprezanja o deformaciji dobiveni iz statičkog vlačnog testa pretvoreni su pomoću poznatih jednadžbi u kompresijsku ovisnost naprezanja o deformaciji.

Apksimirajući stvarne krivulje ovisnosti od granice popuštanja (tečenja) do vlačne čvrstoće linearnom ovisnosti iz koeficijenta smjera dobivenih pravaca određuje se tangenti modul elastičnosti. Njegova srednja vrijednost iznosi  $E_{\tan}=7283$  MPa. Time se materijal može

unijeti kao bilinearan, što je prikazano na slici 38. Nakon unesenih svojstva materijala, u simulaciju se uvodi cilindrični koordinatni sustav te se po geometriji postavljaju tetraedarski konačni elementi, što je prikazano na slici 39.

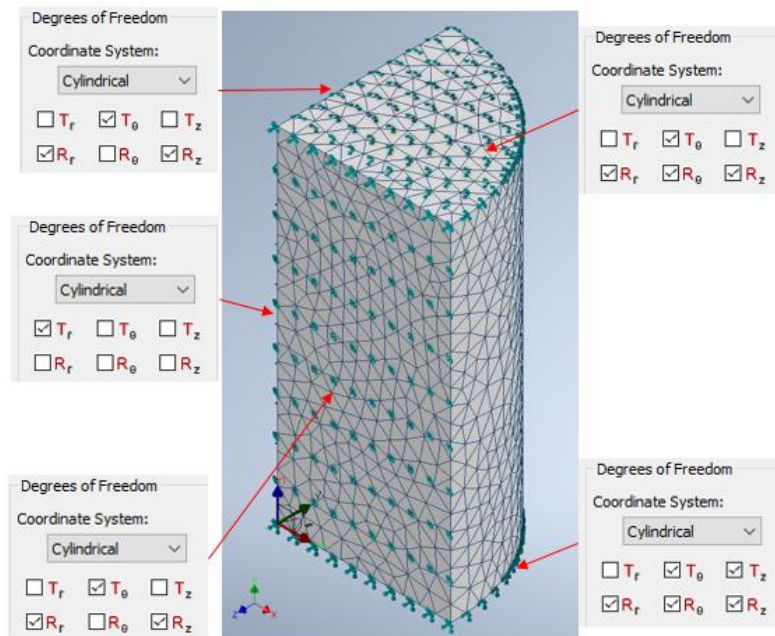


Slika 38. Unos parametara materijala



Slika 39. Cilindrični koordinatni sustav s tetraedarskom mrežom konačnih elemenata

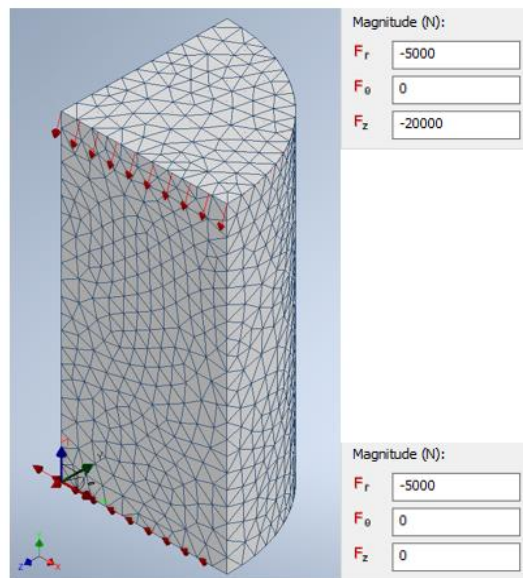
Nakon postavljene mreže postavlja se i rubni uvjeti simetrije te spriječenosti pomaka i rotacija. Postavljeni rubni uvjeti prikazani su na slici 40.



Slika 40. Postavljeni rubni uvjeti

S obzirom da je modelirana geometrija s dvije ravnine simetrije potrebno je postaviti rubni uvjet  $\varphi$  simetrije u cilindričnom koordinatnom sustavu. Pomak u radialnom smjeru spriječen je na središnjici valjka, dok je na donjoj bazi valjka spriječen pomak u vertikalnom smjeru i bilo koja rotacija.

Nakon postavljanja rubnih uvjeta potrebno je postaviti provedeno opterećenje. U ovoj simulaciji pretpostavilo se i trenje na kontaktnim površinama valjka s pretpostavljenim faktorom trenja od 0.25, što je prikazano na slici 41.



Slika 41. Definiranje opterećenja

Važno je istaknuti da unesena brojučana vrijednost sile mora iznositi  $\frac{1}{4}$  ukupne sile, jer je promatrani valjak četvrtina ukupne geometrije.



## 4. REZULTATI I RASPRAVA

U prvom dijelu ovog diplomskog rada dan je detaljan teorijski pregled provedenih mjerenja sabijenih uzoraka. Uzorci su sabijeni različitim opterećenjima na hidrauličkoj preši i pri tome, uzorci imaju različit stupanj deformacije. Cilj ovog istraživanja je uočiti razlike u mikrostrukturi uzoraka nakon svakog sabijanja te mikrostrukturu usporediti s izmjerenim tvrdoćama. Istraživanja su upotpunjena s numeričkom simulacijom sabijanja koja je također povezana s dobivenim rezultatima. Kako bi se provela numerička simulacija bilo je potrebno statičkim vlačnim testom utvrditi mehaničko ponašanje materijala.

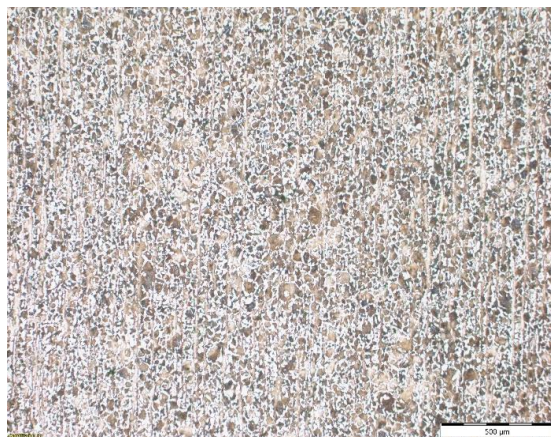
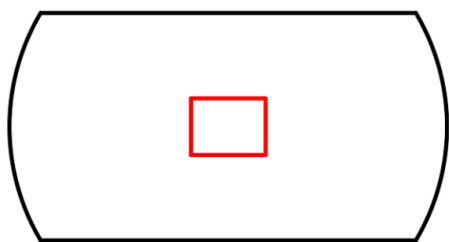
Nadolazeća podpoglavlja razdvojena su s obzirom na provedbu cjelokupne analize ispitivanja problema sabijanja. Najprije će biti predstavljeni rezultati metalografske analize koji će odmah biti analizirani. Zatim će biti predstavljeni rezultati statičkog vlačnog pokusa koji su potrebni za ulazne vrijednosti numeričke simulacije. Nakon poznavanja ponašanja čelika za poboljšavanje pri tlačnom opterećenju biti će predstavljeni rezultati numeričke simulacije sabijanja valjkastih uzoraka. Na kraju će biti predstavljeni rezultati mjerenja tvrdoće s analizom. Zadnje podpoglavlje je povezivanje svih dobivenih rezultata.

### 4.1. Metalografska analiza

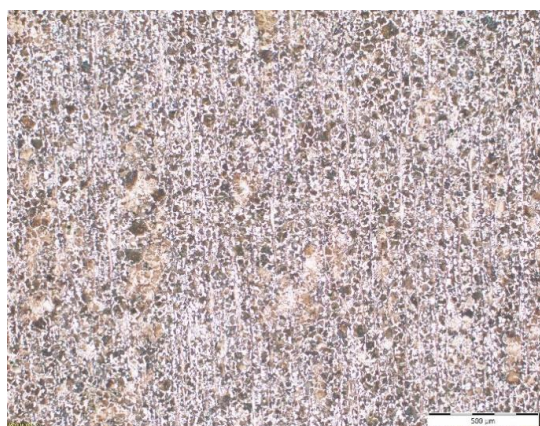
Metalografska analiza obuhvaća promatranje površine uzoraka pomoću svjetlosnog mikroskopa, koji koristi samo jednu leću za uvećavanje. Pomoću njega dobiju se informacije o izgledu površine, mikrostrukturi i pojavama u uzorku, poput uključaka, poroznosti, pukotina i drugih. Za dobivanje točnih informacija 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 9 različitih mjesta (kao i mjerenja tvrdoće prikazana na slici 30) na svakom uzorku kako bi se dobila bolja usporedba. Najuočljivija promjena u veličini zrna može se uočiti na centru svakog uzorka. Stoga su metalografski snimci prikazani samo za centar svih uzoraka pod povećanjem 50 X na slici 42, a pod povećanjem 200 X na slici 43.

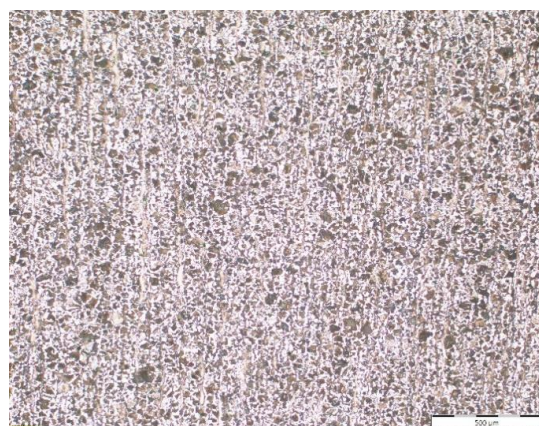
Na prikazanim slikama vidljiva je feritno-perlitna struktura koja je sve sitnija idući prema uzorku broj 4. Feritno-perlitna zrna na uzorku 0 su najveća dok su na uzorku 4 najsitnija. Od nultog pa sve do četvrtog uzorka zrna uslijed drobljenja postaju sve manja.



a) uzorak 0



b) uzorak 1



c) uzorak 2

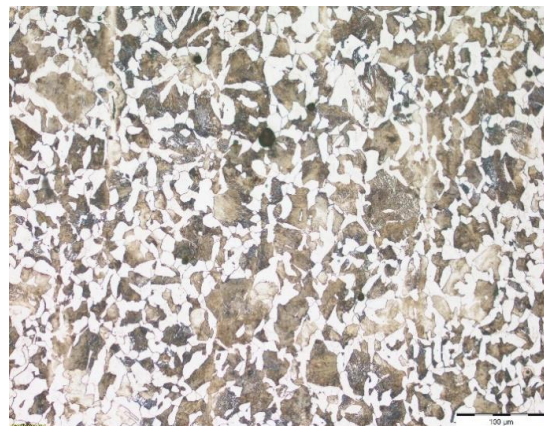
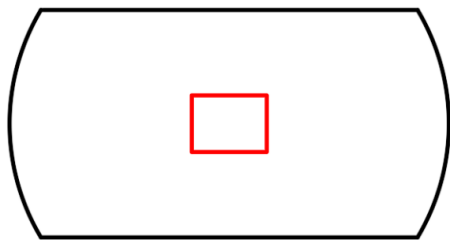


d) uzorak 3



e) uzorak 4

Slika 42. Metalografski snimci uzoraka: a) 0, b) 1, c) 2, d) 3 i e) 4, na sredini uzdužnog presjeka pri povećanju od 50 X



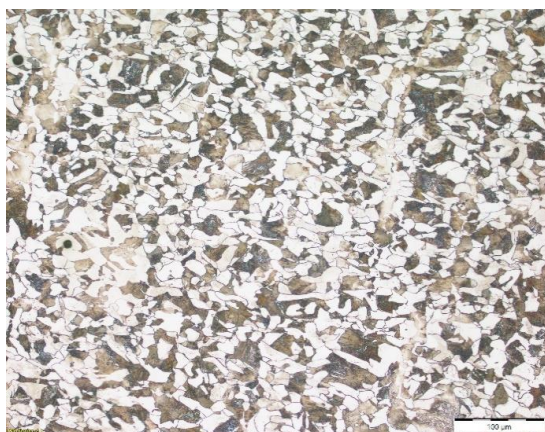
a) uzorak 0



b) uzorak 1



c) uzorak 2



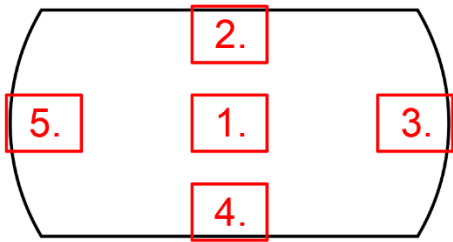
d) uzorak 3



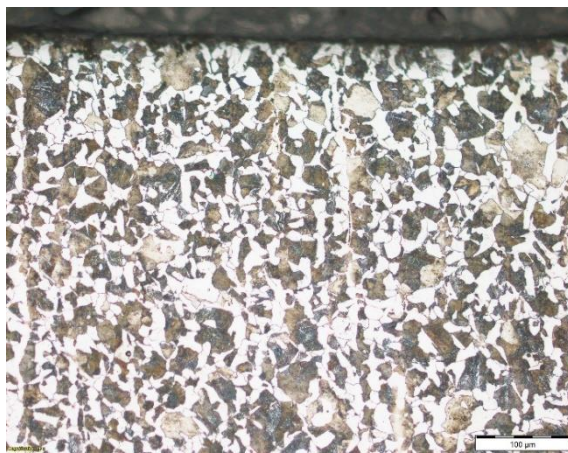
e) uzorak 4

Slika 43. Metalografski snimci uzoraka: a) 0, b) 1, c) 2, d) 3 i e) 4, na sredini uzdužnog presjeka pri povećanju od 200 X

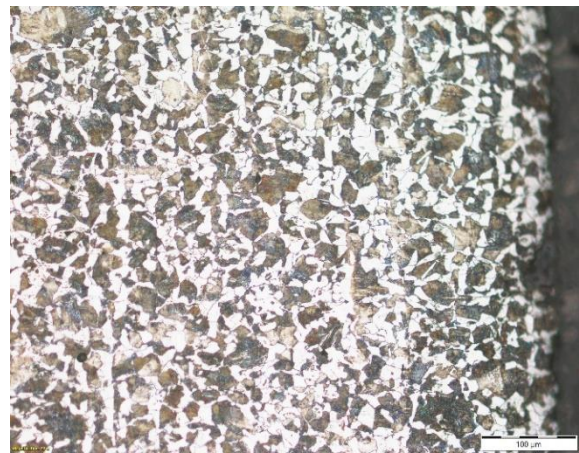
S obzirom da je uzorak 4 pretrpio najveće sabijanje, njegove metalografske snimke po različitim položajima na presjeku bit će prikazane na slici 44.



a) pozicija 1 – centar – 200x



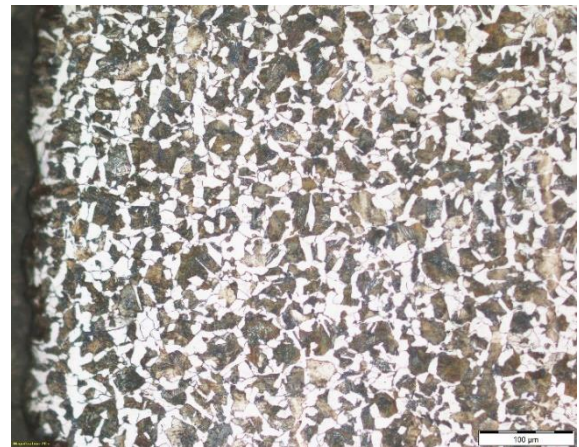
b) pozicija 2 – gornji rub – 200x



c) pozicija 3 – desni rub – 200x



d) pozicija 4 – donji rub – 200x

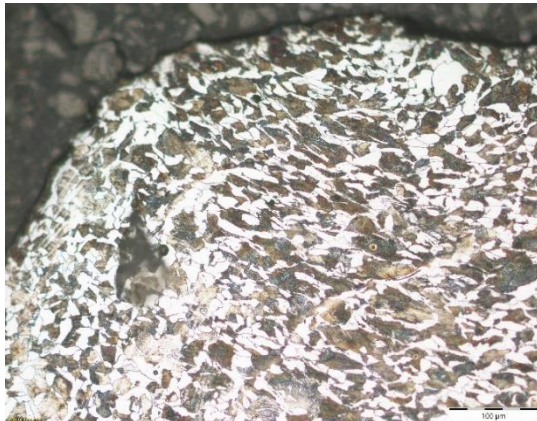
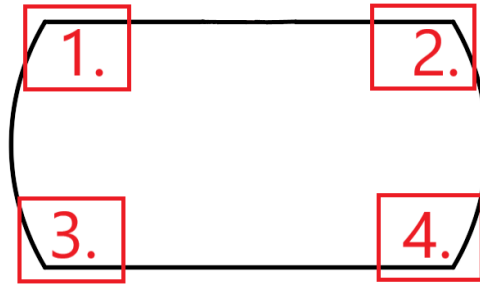


e) pozicija 5 – lijevi rub – 200x

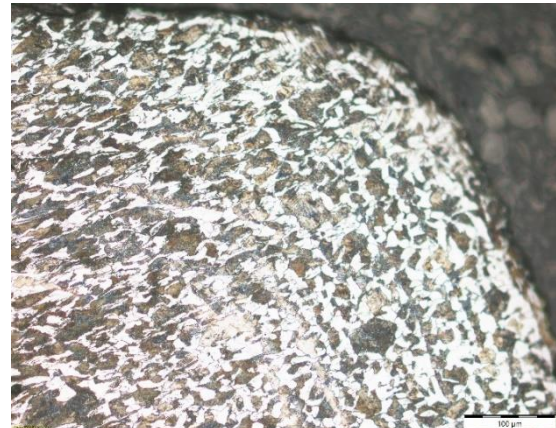
Slika 44. Metalografski snimci uzorka 4 pri povećanju 200 X

Iz prikazanih slika mikrostrukture nije vidljiva nikakva razlika u veličini feritno-perlitnih zrna, ona su ujednačena po cijelom presjeku.

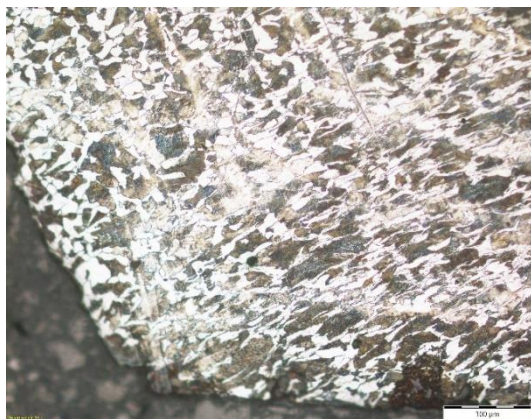
S obzirom da veće promjene nisu uočene na mjestima prikazanim na slici 44, napravljene su metalografske snimke vrhova uzorka 4, koje su prikazane na slici 45.



a) pozicija 1 – gornji lijevi kut - 200x



b) pozicija 2 – gornji desni kut - 200x



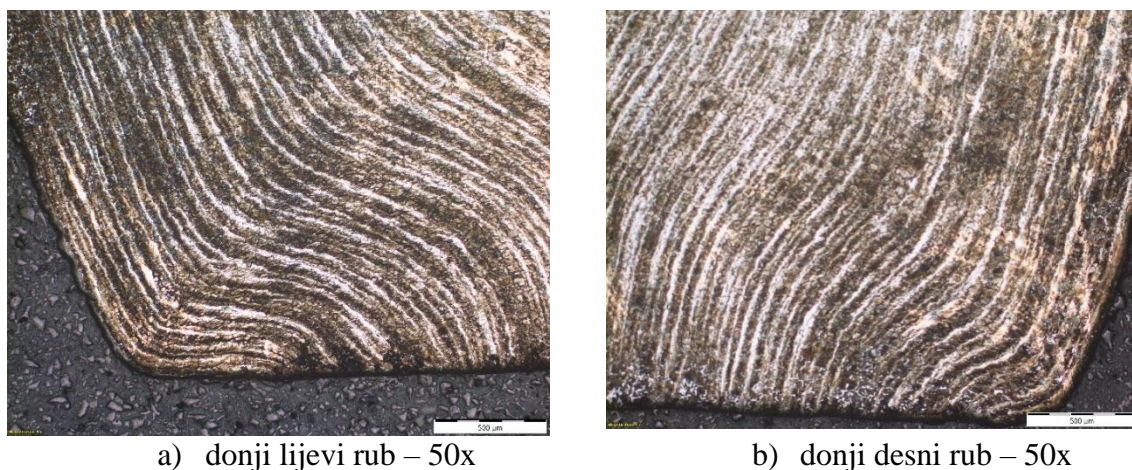
c) pozicija 3 – donji lijevi kut - 200x



d) pozicija 4 – donji desni kut - 200x

Slika 45. Metalografski snimci uzorka 4 nakon nagrizanja nitalom pri povećanju 200 X

Iz prikazanih metalografskih snimaka pri povećanju od 200 puta za uzorak 4, primjećuje se kako su zrna u kutevima jako deformirana što je rezultat najvećeg opterećenja u tom uzorku. Iz slika je vidljivo da se na donjoj bazi, pozicija 3 i 4, zrna najviše zgušnjavaju. Uzorak je ponovno prebrušen i ispoliran te bez nagrizanja promatran navedenim mikroskopom. Metalografski snimci bez nagrizanja prikazani su na slici 46.



a) donji lijevi rub – 50x

b) donji desni rub – 50x

Slika 46. Metalografski snimci donjih kuteva uzorka 4, bez nagrizanja pri povećanju od 50 X

Sa slike se mogu uočiti bijele linije koje su rezultat izvlačenja šipke iz koje su rezani ispitivani valjkasti uzorci. Vrlo jasno se može vidjeti njihova deformacija prilikom sabijanja uzorka

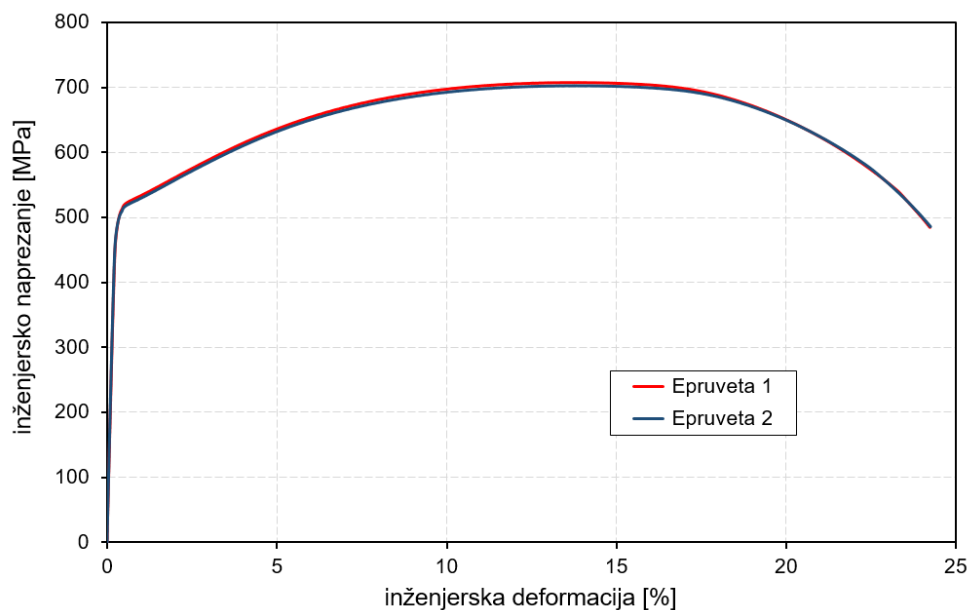
## 4.2. Statički vlačni test

Za provođenje statičkog vlačnog pokusa korištene su dvije epruvete u prošlom poglavlju prikazanih dimenzija. Epruvete se pojedinačno postavljaju u čeljusti kidalice te se kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Statička kidalica pomoću doze očitava silu  $F$  dok eksterni ekstenzometar očitava produljenje  $\Delta l$ . Inženjersko naprezanje  $\sigma$  dobit će se ako se očitana sila  $F$  podijeli s početnom površinom epruvete  $S_0$  koja iznosi  $(d_0^2\pi)/4$ , dok će se inženjersko istežanje (deformacija)  $\varepsilon$  dobiti kad se očitano produljenje  $\Delta l$  podijeli s početnom duljinom mjerenja na ekstenzometru  $l_0$ . Inženjerska krivulja ovisnosti naprežanja o deformaciji za svaku epruvetu prikazana je dijagramom na slici 47.

Računalo na osnovu dobivene krivulje očitava konvencionalnu granicu tečenja tj. popuštanja ( $R_{p0.2}$ ), vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ) i modul elastičnosti ( $E$ ). Navedeni parametri statičkog vlačnog testa dobiveni za svaku epruvetu prikazani su u tablici 5.

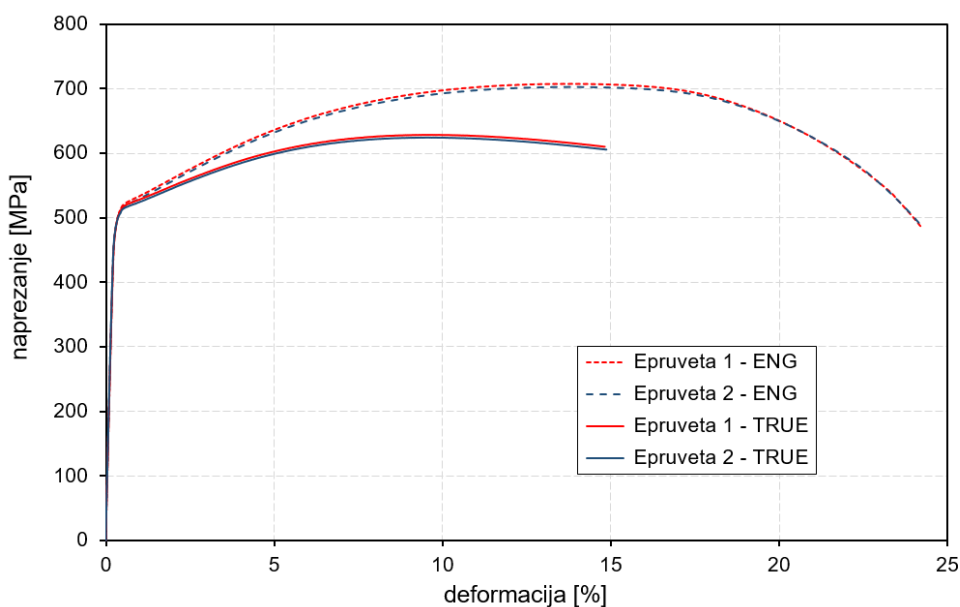
Tablica 5. Mehaničke karakteristike materijala

Č.4732	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$E$ [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]	$A_t$ [%]
Epruveta 1	78,70	199,05	513,975	707,64	24,00	24,24
Epruveta 2	78,70	203,39	509,773	702,82	24,03	24,25
Srednja vrijednost	78,70	201,22	511,87	705,23	24,015	24,245



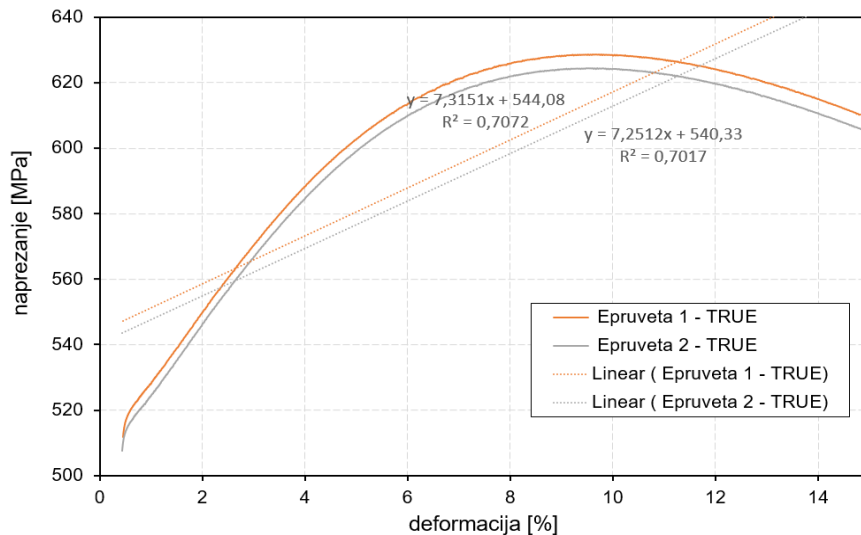
Slika 47. Inženjerska ovisnost naprezanja o deformaciji nakon statičkog vlačnog testa

Podaci inženjerske ovisnosti naprezanja o deformaciji dobiveni iz statičkog vlačnog testa pretvoreni su pomoću poznatih jednadžbi u stvarnu kompresijsku ovisnost naprezanja o deformaciji. Ta stvarna ovisnost naprezanja o deformaciji pri tlačnom opterećenju prikazana je za vrijednosti do vlačne čvrstoće na slici 48.



Slika 48. Ovisnost naprezanja o deformaciji inženjerska vlačna (ENG) i stvarna tlačna (TRUE)

Aproksimirajući stvarne vrijednosti ovisnosti naprezanja o deformaciji za kompresiju od granice popuštanja (tečenja) do vlačne čvrstoće linearnom ovisnosti iz koeficijenta smjera dobivenih pravaca određuje se tangenti modul elastičnosti. Linearne aproksimacije za obje epruvete prikazane su na dijagramu na slici 49.

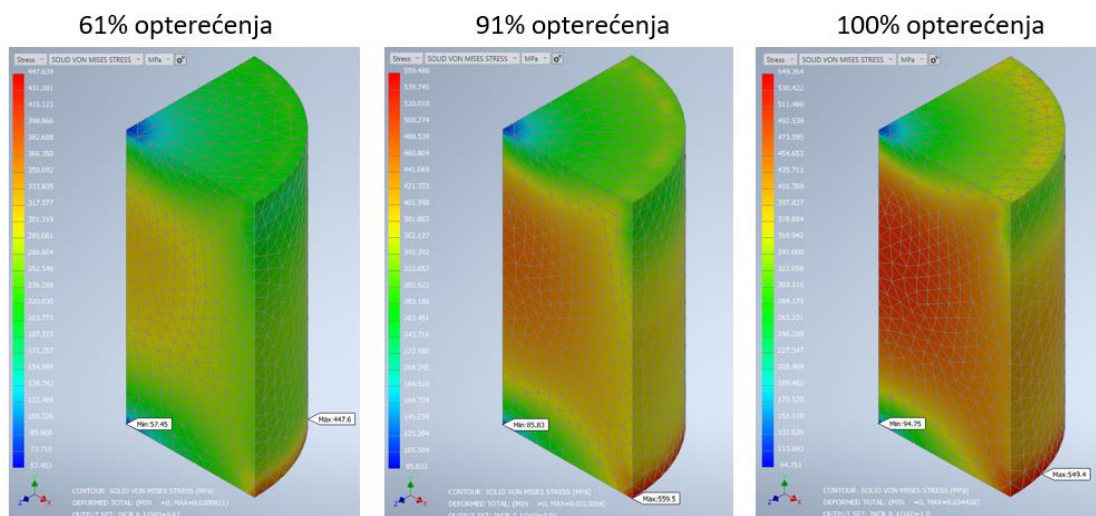


Slika 49. Linearna aproksimacija materijalnog modela od granice popuštanja do vlačne čvrstoće

S prikazane slike može se odrediti tangenti modul elastičnosti, koji je srednja vrijednost koeficijenta smjera aproksimiranih pravaca za svaku epruvetu. On iznosi  $E_{tan}=7283$  MPa. Izračunata srednja vrijednost tangentskog modula elastičnosti bit će postavljena kao ulaz za prikaz bilinearne karakteristike materijala prilikom definiranja numeričke simulacije. U bilinearnoj karakteristici materijala, nagib prvog pravca kojim će biti opisan materijal određuje inicijalni modul elastičnosti do granice tečenja, dok nagib drugog pravca određuje upravo aproksimirani tangenti modul elastičnosti.

### 4.3. Numerička analiza

Nakon provedenog postupka predprocesiranja pokrenuta je numerička simulacija. Rezultati simulacije prikazuju naprezanja za uzorak 1 pod 61% 91% i 100% ukupnog opterećenja (slika 50). Primjećuje se kako je naprezanje najveće u unutrašnjosti uzorka i na donjem vanjskom rubu i to najviše pri 100% opterećenja.

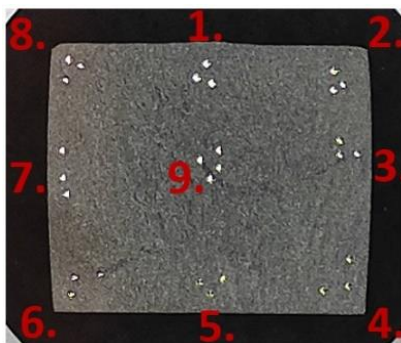


Slika 50. Rezultati naprezanja



#### 4.4. Izmjerene vrijednosti tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je metodom po Vickersu s primijenjenim opterećenjem od 20 kg u vremenu od 10 sekundi. S 9 položaja na svakom uzorku (slika 51) izmjerene su dijagonale najmanje 3 otiska utiskivanja dijamantnog prizmatičnog indentora radi dobivanja što preciznijih rezultata tvrdoće. Vrijednosti izmjerenih tvrdoća po prikazanim položajima prikazano je tablicama. U tablici 6 prikazane su izmjerena vrijednosti tvrdoće za uzorak 0, u tablici 7 za uzorak 1, u tablici 8 za uzorak 2 u tablici 9 za uzorak 3, a u tablici 10 za uzorak 4. Svim izmjerenim vrijednostima izračunata je srednja (uprosječena) vrijednost po prikazanim položajima i po cijelom uzorku.



Slika 51. Uzdužni presjek sabijenog uzorka s naznačenim položajima utiskivanja

Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 0

UZORAK 0	HV20, 10 sec.				
	1.	2.	3.	4.	Srednja vrijednost
1.	234,7	239,2	240,1	233,7	236,9

Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1

UZORAK 1	HV20, 10 sec.			
	1.	2.	3.	Srednja vrijednost
1.	249,1	254,1	252,9	252,0
2.	263,8	265,3	263,0	264,0
3.	263,8	265,9	261,2	263,6
4.	261,8	256,5	253,7	257,3
5.	245,1	249,1	246,6	246,9
6.	269,0	266,5	260,4	265,3
7.	273,9	273,1	268,9	272,0
8.	268,1	257,1	269,7	265,0
9.	266,7	270,4	274,5	270,5
Srednja vrijednost				261,9

Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2

UZORAK 2	HV20, 10 sec.			
	1.	2.	3.	Srednja vrijednost
1.	261,6	262,3	257,7	260,5
2.	276,5	268,9	264,5	270,0
3.	275,5	277,2	275,1	275,9
4.	279,2	282,3	283,6	281,7
5.	258,2	254,7	262,7	258,5
6.	271,6	271,6	272,3	271,8
7.	284,2	285,1	284	284,4
8.	285,6	285,6	288,4	286,5
9.	295,4	292,6	292,6	293,5
Srednja vrijednost				275,9

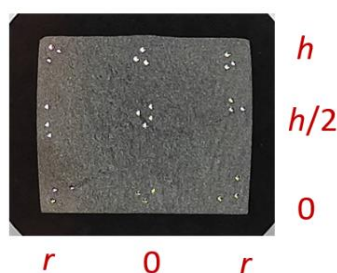
Tablica 9. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3

UZORAK 3	HV20, 10 sec.			
	1.	2.	3.	Srednja vrijednost
1.	249,3	254,9	256,6	253,6
2.	295,1	305,8	284	295,0
3.	281,9	282	282,4	282,1
4.	272,7	273,6	274,2	273,5
5.	251,1	241,8	256,1	249,7
6.	287,1	304,4	297,8	296,4
7.	279,9	275,8	276,7	277,5
8.	285,9	265,5	270,3	273,9
9.	297,2	300,4	300,1	299,2
Srednja vrijednost				275,9

Tablica 10. Vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4

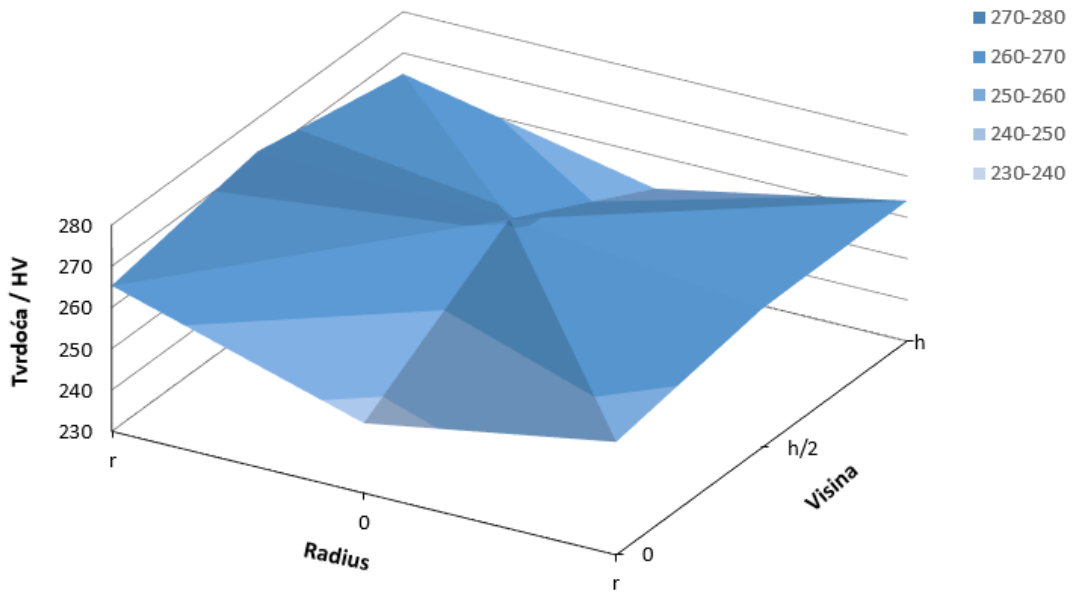
UZORAK 4	HV20, 10 sec.			
	1.	2.	3.	Srednja vrijednost
1.	259,8	256,9	258,1	258,3
2.	296,7	286,4	301,3	294,8
3.	280,3	298,9	301	293,4
4.	307,5	298,6	313,2	306,4
5.	242,7	237,7	240,5	240,3
6.	282,7	280,3	289,2	284,1
7.	292,4	283,2	287,7	287,8
8.	301,8	292,6	315,4	303,3
9.	299,8	305,7	312,4	306,0
Srednja vrijednost				286,0

U prezentiranim tablicama izmjerenih tvrdoća na svakom uzorku po naznačenom položaju izračunate su srednje vrijednosti tvrdoća. Te srednje vrijednosti tvrdoća na svakom uzorku po položaju prikazane nad visinom i radijusom svakog uzorka prema shemi koja je prikazana na slici 52.

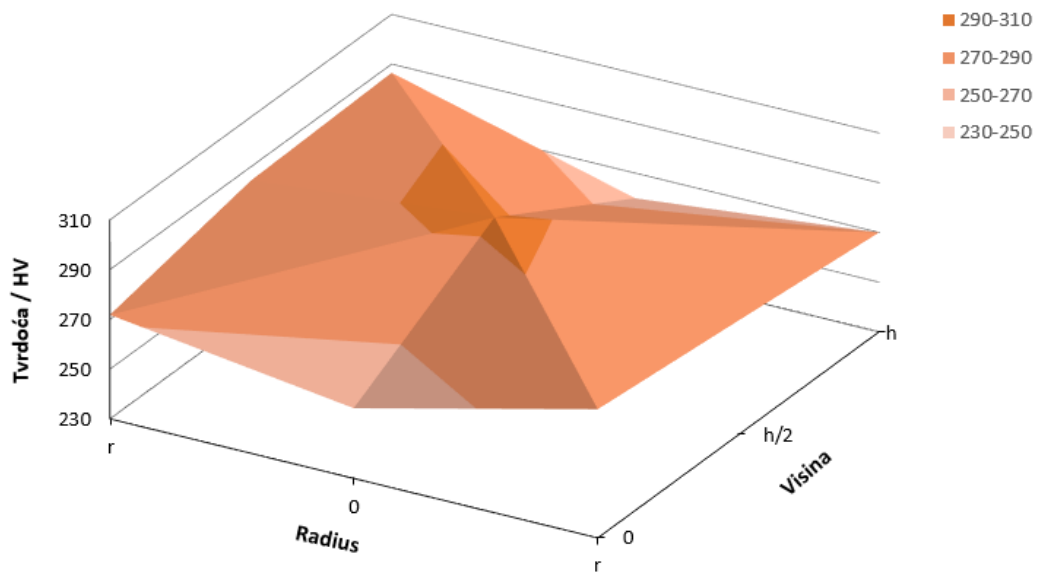


Slika 52. Shema prikaza visine i radijusa svakog uzdužnog presjeka uzoraka

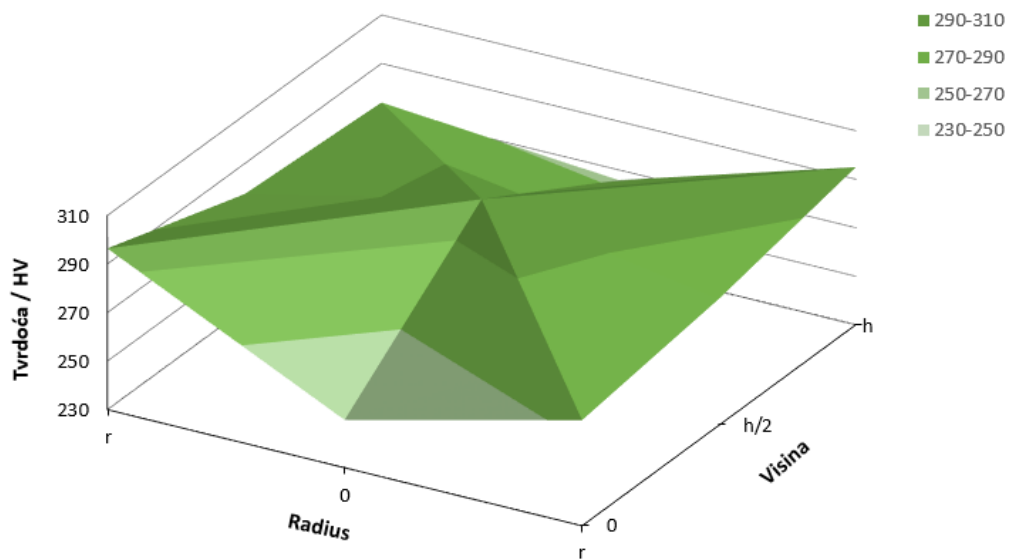
Uprosječene vrijednosti tvrdoća na svakom uzorku po položaju prikazane su prostornim dijagramom pomoću linearne interpolacije i to za uzorak 1 na slici 53, za uzorak 2 na slici 54, za uzorak 3 na slici 55 te za uzorak 4 na slici 56.



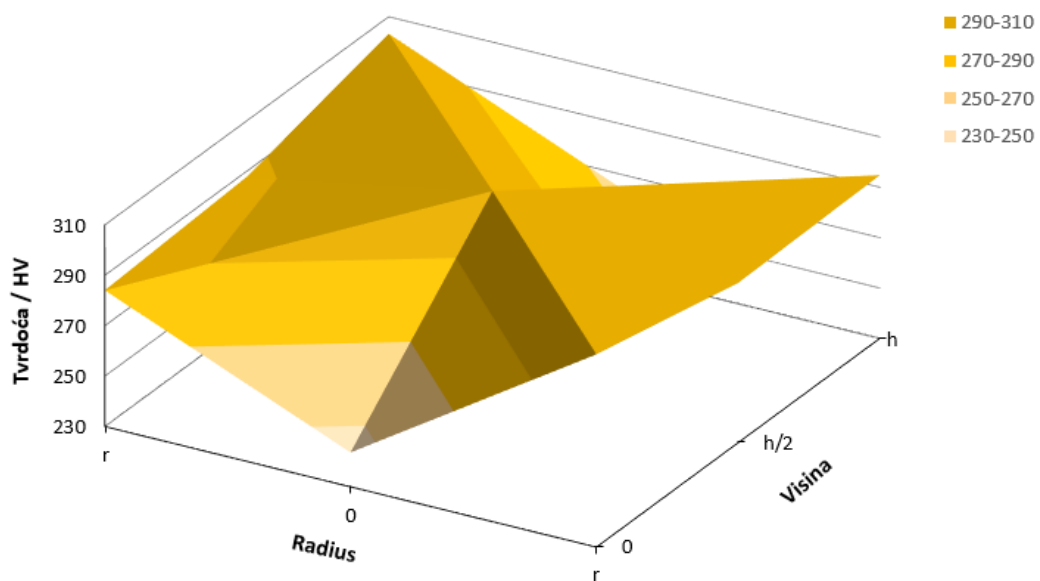
Slika 53. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 1



Slika 54. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 2

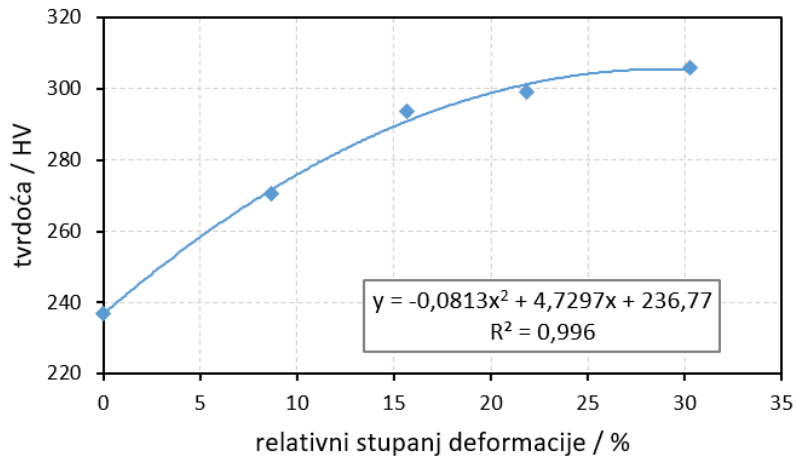


Slika 55. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 3

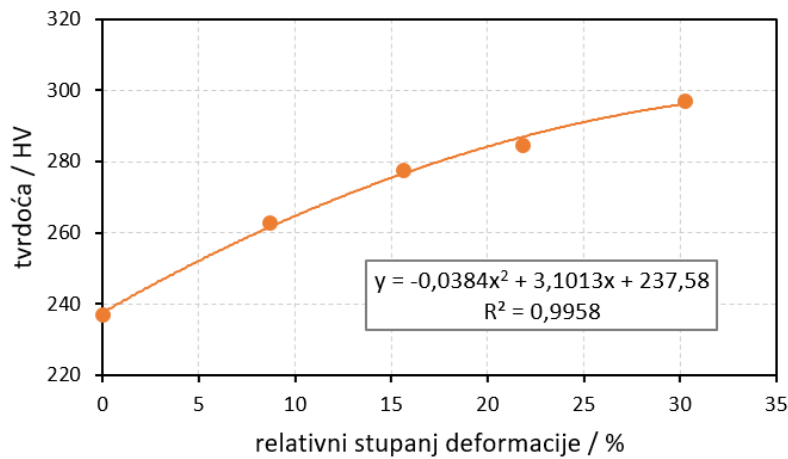


Slika 56. Linearna interpolacija uprosječenih vrijednosti tvrdoće po položaju za uzorak 4

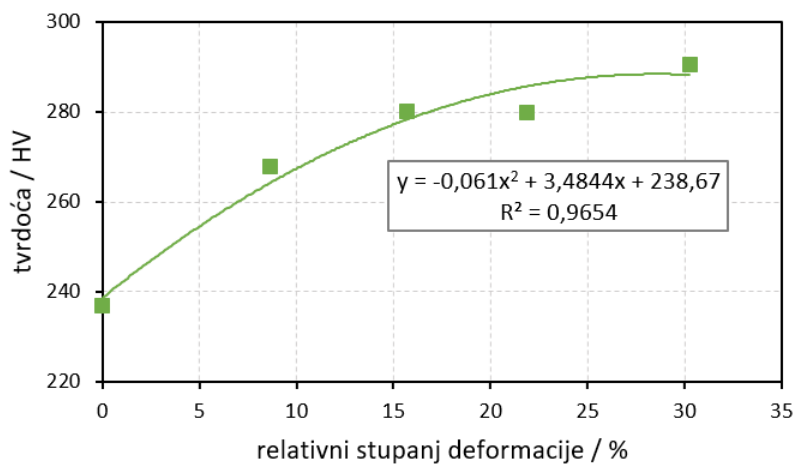
Kako bi se što bolje analizirale uprosječene vrijednosti tvrdoća karakterističnih položaja na svakom uzorku napravljena je njihova ovisnost o relativnom stupnju deformacije koji se za svaki uzorak povećava. Uzorak 0 je nedeformiran, uzorak 1 ima 8,7% deformacije, uzorak 2 ima 15,7% deformacije, uzorak 3 ima 21,9% deformacije i uzorak 4 ima 30,3% deformacije sabijanjem. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoće o relativnom stupnju deformacije prikazana je na slici 57 za sredinu svakog uzorka (položaj 9), na slici 58 za vrhove uzoraka (položaj 2, 4, 6 i 8), na slici 59 za vanjski radijus na polovini visine uzorka (položaj 3 i 7), na slici 60 za središnjicu gornje i donje baze valjkastog uzorka (položaj 1 i 5). Na slici 61 prikazana je ovisnost uprosječene tvrdoće zanemarujući položaj utiskivanja po uzorcima.



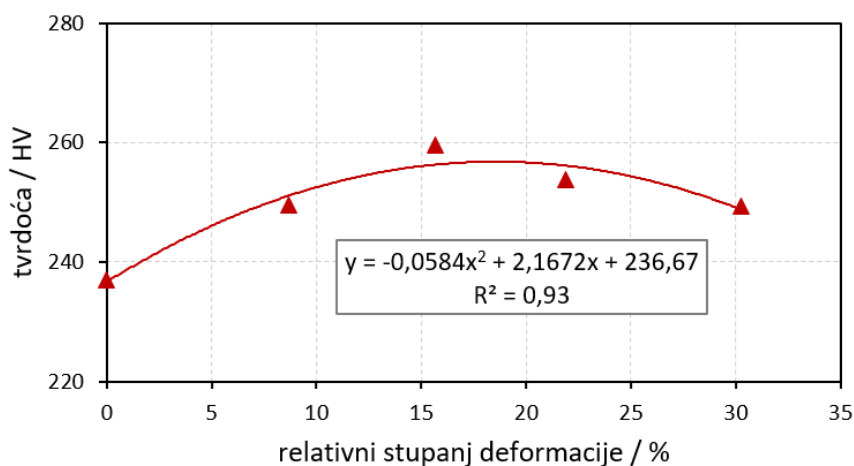
Slika 57. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća na sredini uzoraka (položaj 9) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju



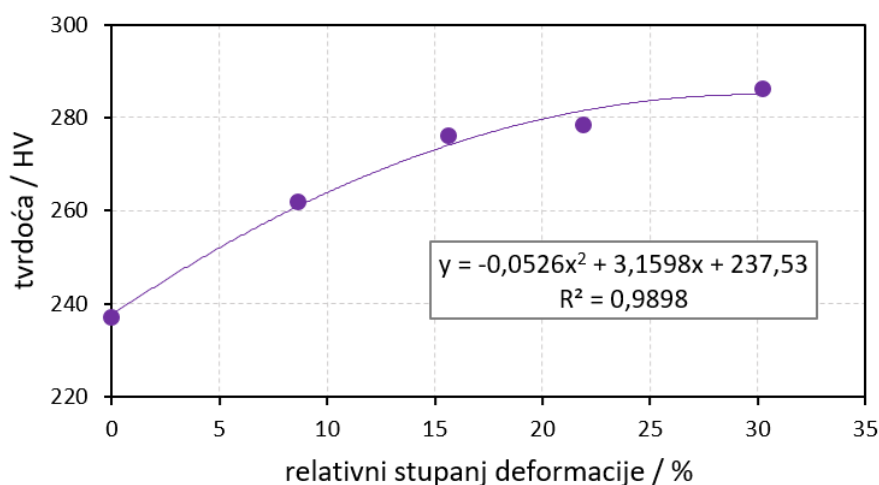
Slika 58. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća u vrhovima uzoraka (položaj 2, 4, 6 i 8) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju



Slika 59. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća na vanjskom radijusu na polovini visine uzoraka (položaj 3 i 7) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju



Slika 60. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća na središnjici gornje i donje baze uzoraka (položaj 1 i 5) o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju



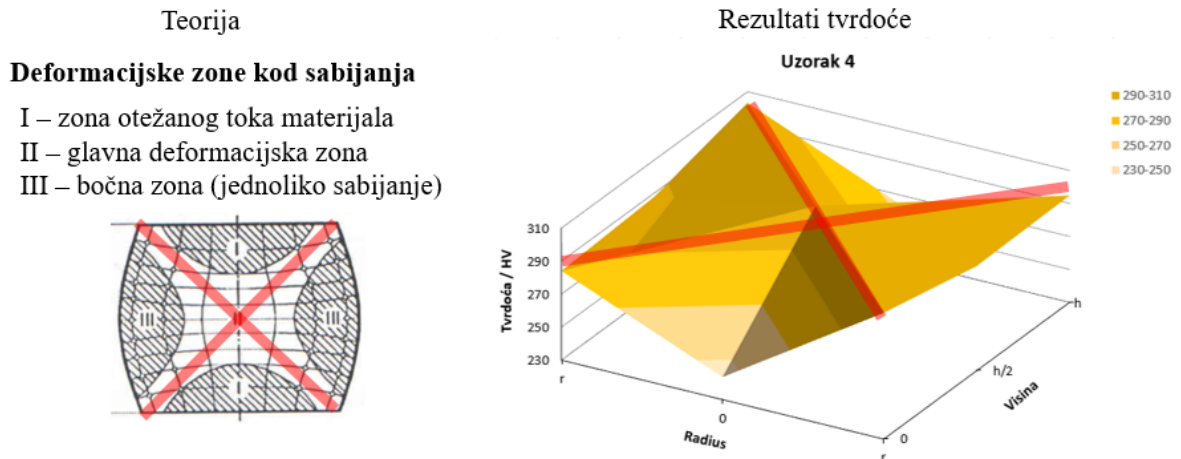
Slika 61. Ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća uzoraka o relativnom stupnju deformacije pri sabijanju

Svaka prikazana ovisnost uprosječenih vrijednosti tvrdoća o relativnom stupnju deformacije sabijanjem je aproksimirana kvadratnom funkcijom u kojoj  $x$  predstavlja podatak relativnog stupnja deformacije, a  $y$  podatak uprosječne 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  $R^2$  između 0,93 i 0,996, što je vrlo zadovoljavajuća aproksimacija.

U svim analizama aproksimirana kvadratna ovisnost konkavno raste s povećanjem stupnja deformacije tj. s promatranjem sve sabijenijeg uzoraka. Jedino se kod promatranja sredine gornje i donje baze valjkastih uzoraka ta ovisnost na kraju neznatno spušta, a nju je uzrokovalo neočekivano povećanje tvrdoće uzorka 2 koje je i izazvalo pad kvadratne funkcije.

## 4.5. Povezivanje rezultata

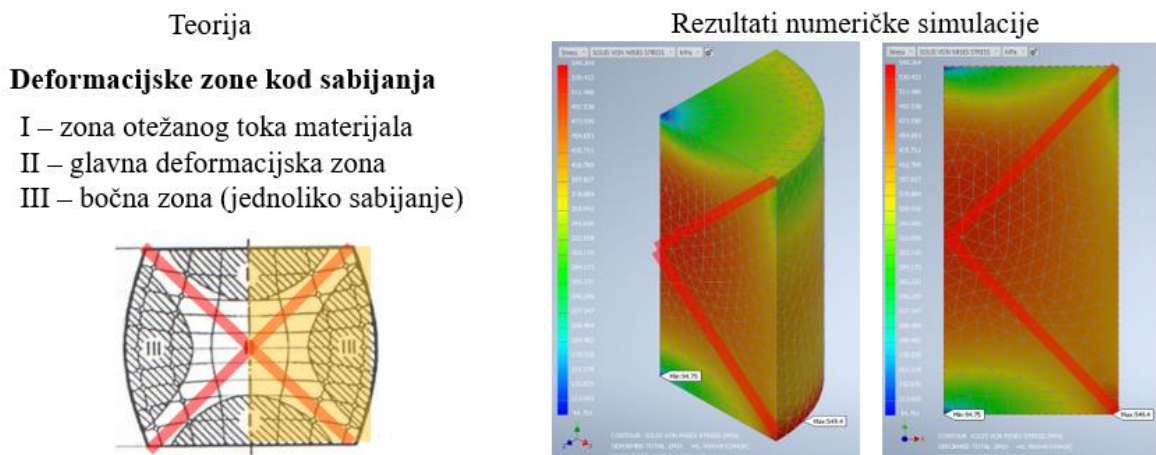
Metalografske snimke i rezultati mjerenja tvrdoće zasebno su analizirani nakon prikazanih rezultata, ali ti rezultati nisu međusobno povezani. Njihova povezanost prikazat će se u ovom odlomku. Najprije će se povezati teorijske osnove slobodnog sabijanja s rezultatima izmjerene tvrdoće, što je prikazano na slici 62.



Slika 62. Usporedba teorije slobodnog sabijanja i rezultata tvrdoće

Povezivanjem teorije slobodnog sabijanja i rezultata tvrdoće vidljivo je da su u glavnoj deformacijskoj zoni (naznačeno crvenom linijom na slici 62) prilikom sabijanja rezultati tvrdoće najveći po svakom sabijenom uzorku, a na slici 62 su prikazani rezultati uzorka 4.

Na slici 63 dana je povezanost teorije slobodnog sabijanja s rezultatima napreznja numeričke simulacije.

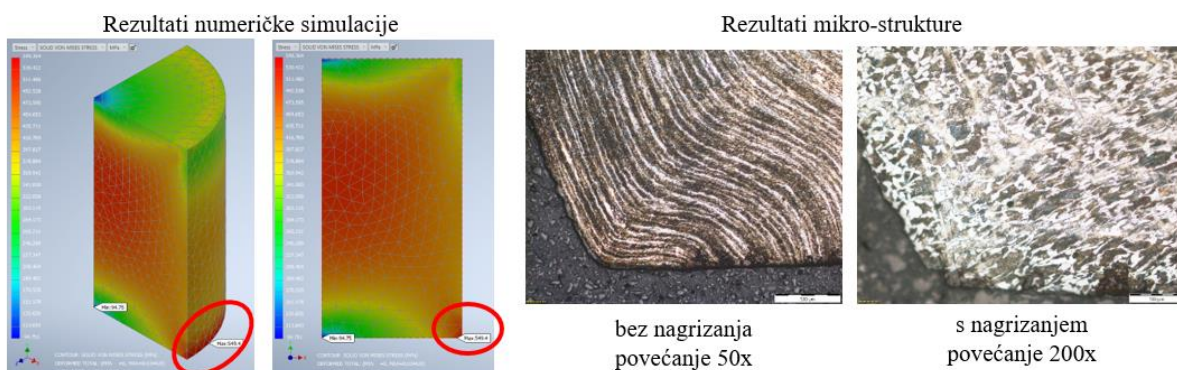


Slika 63. Usporedba teorije slobodnog sabijanja i rezultata napreznja numeričke simulacije



Povezivanjem teorije slobodnog sabijanja i rezultata numeričke simulacije vidljivo je da su na glavnoj deformacijskoj zoni vrijednosti napezanja najveće, što je naznačeno crvenom linijom na slici 63. Minimalne vrijednosti napreznja nalaze se u zoni otežanog toka materijala koja je definirana teorijom slobodnog sabijanja.

Na slici 64 prikazana je povezanost rezultata napreznja numeričke simulacije i metalografskih snimaka.



Slika 64. Usporedba rezultata napreznja numeričke simulacije i metalografske analize

Analizom rezultata napreznja dobivenih numeričkom simulacijom vidljivo je da su maksimalna napreznja pozicionirana na vanjskom radijusu donje baze valjkastog uzorka, što je označeno crvenom elipsom na slici 64. Maksimalno napreznje potvrđuje se s metalografskim snimkama vrhova uzorka 4 i zbijenom feritno-perlitnom strukturom prikazanoj na snimci s nagrizanjem (desno) te deformiranim bijelim linijama izvlačenja šipke iz koje su uzeti valjkasti uzorci što je prikazano na izdvojenoj metalografskoj snimci bez nagrizanja (lijevo).

U odlomku teorijskog dijela 2.6. ovog diplomskog rada spomenuto je da pojedini autori povezuju vrijednosti tvrdoće i čvrstoće. Identična analiza prezentirana u teorijskom dijelu napravljena je za dobivene rezultate napreznja i tvrdoće osnovnog ne sabijenog materijala Č.4732 za uzorak 0. Rezultati izračuna omjera tvrdoće i granica čvrstoće ( $HV/R_{p0.2}$  i  $HV/R_m$ ) za uzorak 0 prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Omjeri tvrdoće i granica čvrstoće ( $HV/R_{p0.2}$  i  $HV/R_m$ ) za uzorak 0

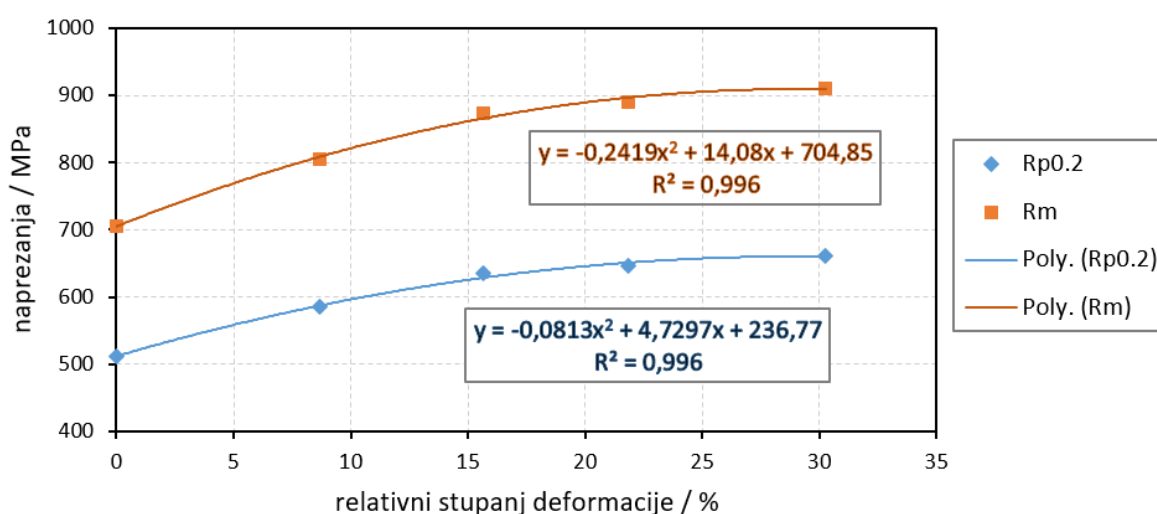
Č.4732	$\sigma$ [MPa]		HV [MPa]	HV/ $\sigma$	
	$R_{p0.2}$	$R_m$		HV/ $R_{p0.2}$	HV/ $R_m$
Uzorak 0	511,87	705,23	2323,99	4,54	3,29

Zadržavajući dobivene omjere tvrdoće i granica čvrstoće ( $HV/R_{p0.2}$  i  $HV/R_m$ ), mogli bi na osnovu tih omjera i izmjerenih srednjih vrijednosti tvrdoća ostalih uzoraka izračunati vrijednosti granica čvrstoće za različite stupnjeve deformacije svakog sabijenog uzorka. Rezultati vrijednosti napreznja (granice popuštanja (tečenja) i vlačne čvrstoće) prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Izračunate vrijednosti naprezanja na osnovu dobivenih omjera za uzorak 0

Č.4732	HV	HV [MPa]	$\sigma$ [MPa]	
			$R_{p0.2}$	$R_m$
Uzorak 1	270,5	2653,93	584,54	805,35
Uzorak 2	293,5	2879,24	634,24	873,82
Uzorak 3	299,2	2935,15	646,55	890,79
Uzorak 4	306,0	3001,86	661,10	910,84

Na osnovu izračunatih vrijednosti naprezanja, prikazanih u tablici 12, dijagramom se može prikazati njihova ovisnost o stupnju deformacije. Na slici 65 prikazana je ovisnost granice tečenja i vlačne čvrstoće o stupnju deformacije pri sabijanju svakog uzorka.



Slika 65. Ovisnost graničnih naprezanja ( $R_m$  i  $R_{p0.2}$ ), izračunatih pomoću izmjerene tvrdoće o stupnju deformacije

Izračunate vrijednosti graničnih naprezanja prikazane su na slici 65 za granicu popuštanja (tečenja) ( $R_{p0.2}$ ) plavim kvadratićima, dok su za vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ) prikazane narančastim kvadratićima. Obje vrijednosti su aproksimirane kvadratnim funkcijama koje su konkavno rastuće.

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je provesti eksperiment sabijanja valjkastih uzoraka materijala 42CrMo4 (Č.4732) pod nekoliko različitih opterećenja (8 t, 14 t, 20 t i 24 t) na hidrauličkoj preši. Rezultat tog sabijanja su različiti stupnjevi deformacije svakog uzorka. Nakon provedenog eksperimenta napravljena je analiza dobivenih rezultata za sve uzorke kako bi se uočile promjene. Provedena analiza sastojala se od metalografske analize i mjerenja tvrdoće. Uz navedene analize, provedena je i numerička simulacija sabijanja za koju je bilo potrebno provesti statički vlačni test kako bi se definirala karakteristika materijala.

Provedena istraživanja pokazala su sljedeće:

- metalografskom analizom utvrđeno je da porastom stupnja deformacije dolazi do usitnjenja feritno-perlitnih zrna;
- metalografskom analizom utvrđeno je da se intenzivna zbijenost zrna odvija u vrhovima, točnije na vanjskom rubu donje baze valjkastog uzorka;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da tvrdoće na uzorcima rastu konkavnom kvadratnom funkcijom s povećanjem stupnja deformacije;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da su tvrdoće maksimalne, po uzdužnom presjeku uzorka, na sredini i u vrhovima;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da se maksimalne vrijednosti tvrdoće nalaze na glavnoj deformacijskoj zoni koja je definirana teorijom slobodnog sabijanja;
- rezultati naprezanja numeričke simulacije pokazuju minimalne vrijednosti na središtu gornje i donje baze valjkastih uzoraka, a maksimalne vrijednosti na vanjskom rubu donje baze valjkastog uzorka;
- rezultati naprezanja numeričke simulacije pokazuju da se najveća naprezanja nalaze na glavnoj deformacijskoj zoni koja je definirana teorijom slobodnog sabijanja;
- rezultati naprezanja numeričke simulacije pokazuju da se najmanja naprezanja nalaze u zoni otežanog toka materijala koja je definirana teorijom slobodnog sabijanja;
- rezultati naprezanja numeričke simulacije pokazuju da se položaj najvećeg naprezanja (vanjski rub donje baze valjkastog uzorka) lijepo može vidjeti na izrazito zgusnutoj feritno-perlitnoj strukturi u donjem vrhu valjkastog uzorka.

## 6. LITERATURA

- [1] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2014.
- [2] M. Pulić, Precipitacijsko očvršćivanje toplinski obradive aluminijeve legure, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva I brodogradnje, 2015.
- [3] J. Hribar, Plastična obradba metala, u Tehnička enciklopedija Vol.10, Zagreb, Jugoslavenski Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1963-1997, pp. 311-339.
- [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] I. Mamuzić, Teorija plastične deformacije metala, Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2000.
- [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] B. Bardes, Properties and Selection: Irons and Steels u Metals Handbook, American Society for Metals, 1978, p. 221.
- [9] D. Čorić, Ž. Alar, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, ak.god. 2016/2017.
- [10] I. Alfirević, D. Bjelovučić, I. Budin, B. Matijašević i suradnici: Inženjerski priručnik IP4, Proizvodno strojarstvo: Materijali, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [11] I. Vitez, Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala, Sveučilište Josipa Jurija Strossmayera u Osijeku, Strojarški fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2006.
- [12] M. Jakovljević, Statičko vlačno ispitivanje pri povišenim temperaturama, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [13] T. Filetin, M. Franz, Đ. Španićek and V. Ivušić, Svojstva i karakteristike materijala, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [14] B. Song, B. Sanborn: Relationship of compressive stress-strain response of engineering materials obtained at constant engineering and true strain rates, International Journal of Impact Engineering, vol. 119, 2018, pp 40-44.
- [15] J. Sorić, Uvod u numeričke metode u strojarstvu, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [16] J. Sorić, Metoda konačnih elemenata, Zagreb: Golden marketing-Tehnička knjiga, 2004.
- [17] T. Lesičar, Analiza cjelovitosti kućišta ventila, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [18] L. Kovačić, Analiza naprezanja u debelostijenim cilindričnim posudama i cijevima., Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [19] I. Vitez, M. Oruč, R. Snulahpašić, Ispitivanje metalnih materijala, Univerzitet u Zenici Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2006. (preuzeto 20.6.2022.)
- [20] E. L. Ritz, Analiza mikrostrukture i tvrdoće sučeono zavarenog spoja MIG postupkom, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2022.
- [21] Z. Majcen, Pouzdanost prijenosnih metoda ispitivanja tvrdoće, diplomski rad, Varaždin: Sveučilište Sjever, 2020.

- [22] <https://www.hardnessgauge.com/testing-types/vickers-hardness-testing/>  
(preuzeto 8.11.2022)
- [23] B. Kraut, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1988.
- [24] P. Zhang, S.X. Li, Z.F. Zhang, General relationship between strength and hardness Materials Science and Engineering A, pp. 62-73, 2011.
- [25] S. Kožuh, Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.

# ŽIVOTOPIS

## Osobni podatci:

Ime i prezime: Klara Šimić  
Datum i mjesto rođenja: 02. 06. 1998., Sisak  
Adresa: Stupno 119  
Grad: Sisak  
Država: Republika Hrvatska  
Telefon: 098 979 7722  
E-mail: [klaras0206@gmail.com](mailto:klaras0206@gmail.com)

## Obrazovanje:

2005.g. – 2013.g. Osnovna škola Sela  
2013.g. – 2017.g. Srednja škola: Tehnička škola Sisak, smjer: Ekološki tehničar  
2017.g. – 2020. g. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, preddiplomski studij  
Metalurgija, smjer Industrijska ekologija (univ.bacc.ing.met.).

## Osobne vještine:

Aktivno korištenje MS Office paketa  
B2 kategorija engleskog jezika  
B kategorija vozačke dozvole