

# Utjecaj brzine deformacije na tvrdoću materijala u procesu sabijanja u hladnom stanju

---

Šokec, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:558114>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Josip Šokec**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Zdenka Keran, dipl. ing.

Student:

Josip Šokec

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc.dr.sc Zdenki Keran, dipl.ing na ukazanom povjerenju, pruženoj pomoći i stručnim savjetima prilikom izrade ovog rada.

Želim se zahvaliti obitelji, kolegama i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Najveća zahvala ide mojim roditeljima i sestri koji su bili uz mene u dobru i zlu i koji su bili najveći oslonac tijekom cijelog školovanja.

Josip Šokec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

### DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP ŠOKEC** Mat. br.: 0035210302

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj brzine deformacije na tvrdoću materijala u procesu sabijanja u hladnom stanju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Impact of deformation rate on the hardness of the material in the cold upsetting process**

Opis zadatka:

Proces oblikovanja u hladnom stanju značajno utječe na mehanička svojstva metalnog materijala koji se oblikuje. Pri tome tehnološki parametri, poput brzine deformacije i temperature, doprinose ovom utjecaju.

U radu je potrebno obraditi sljedeće:


1. Opisati osnovne parametre koji utječu na promjenu mehaničkih svojstava oblikovanog materijala. Objasniti mehanizme očvršćavanja materijala, a posebnu pažnju obratiti na tumačenje rasporeda naprezanja prilikom procesa slobodnog sabijanja te navesti i objasniti parametre koji utječu na veličinu naprezanja. Povezati parametre procesa sa očvršćavanjem materijala u slobodnom sabijanju.
2. Eksperimentalno ispitati utjecaj brzine deformacije na tvrdoću materijala za dvije različite legure (leguru aluminija i leguru bakra) nakon provedenog procesa slobodnog sabijanja u hladnom stanju za različite stupnjeve deformacije. Kako bi se postigla različita brzina deformacije, sabijanje provoditi na gravitacijskom batu i na hidrauličnoj preši.
3. Numeričkom simulacijom utvrditi raspored naprezanja tijekom procesa slobodnog sabijanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:   
prof. dr. sc. Zdenka Keran

Predsjednica Povjerenstva:   
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. OSNOVNI PRINCIPI OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM.....	2
2.1. Deformacija.....	2
2.1.1. Temeljni zakoni deformiranja .....	3
2.1.2. Plastična deformacija .....	3
2.1.3. Deformacija monokristala.....	5
2.1.4. Deformacija polikristala.....	7
2.2. Podjela postupaka oblikovanja deformiranjem.....	8
2.3. Plastično tečenje materijala.....	9
2.3.1. Uvjet plastičnog tečenja .....	10
2.4. Mehanizmi očvršćivanja materijala .....	11
2.4.1. Deformacijsko očvršćivanje.....	11
2.4.2. Očvršćavanje kristalima mješancima.....	12
2.4.3. Precipitacijsko očvršćivanje.....	12
2.4.4. Očvršćivanje granicama zrna.....	13
3. SABIJANJE MATERIJALA.....	14
3.1. Utjecaj faktora trenja na sabijanje materijala.....	14
4. TEORIJA DISLOKACIJA .....	16
4.1. Gibanje dislokacija.....	19
4.2. Brzina gibanja dislokacija.....	22
4.3. Burgersov vektor.....	23
4.4. Gustoća dislokacija .....	23
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	25
5.1. Mjerenja tvrdoće .....	26
5.2. Usporedba tvrdoća postignutih različitim brzinama deformacije .....	32
6. RAČUNALNA SIMULACIJA .....	34
6.1. Pokretanje programa .....	34
6.2. Konstrukcija valjčića.....	34
6.3. Mreža konačnih elemenata.....	35
6.4. Unos svojstava aluminija i bakra .....	36
6.5. Određivanje rubnih uvjeta.....	40
6.6. Definiranje tijela .....	41
6.6.1. Tablice brzine gravitacijskog bata i hidraulične preše.....	42
6.7. Određivanje kontaktnog međudjelovanja .....	44

---

6.8. Definiranje slučaja opterećenja .....	45
6.9. Pokretanje simulacije .....	46
6.10. Rezultati računalne simulacije .....	48
6.10.1. Prikaz sabijanja aluminija hidrauličnom prešom .....	48
6.10.2. Prikaz sabijanja aluminija gravitacijskim batom .....	49
6.10.3. Prikaz sabijanja bakrene legure hidrauličnom prešom .....	50
6.10.4. Prikaz sabijanja bakrene legure gravitacijskim batom.....	51
7. ZAKLJUČAK.....	53
LITERATURA.....	54
PRILOZI.....	56

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Promjena dimenzija prilikom deformiranja silom F [4] .....	2
Slika 2. $\sigma - \epsilon$ dijagram duktilnog materijala [5] .....	4
Slika 3. Elastična i plastična deformacija monokristala [1] .....	5
Slika 4. Klizanje [1] .....	6
Slika 5. Prostorno plošna kristalna rešetka – FCC [3] .....	6
Slika 6. Prostorno centrirana kristalna rešetka – BCC [3] .....	6
Slika 7. Heksagonalna kristalna rešetka – HCP [3] .....	6
Slika 8. Blizančanje ili srastanje [1] .....	7
Slika 9. Različita orijentacija ravnina klizanja u zrnima polikristala [1] .....	8
Slika 10. Podjela postupaka deformiranja prema vrsti naprezanja [3] .....	8
Slika 11. Krivulja tečenja i razvlačenja [3] .....	10
Slika 12. Ovisnost čvrstoće metala o gustoći lokacija [12] .....	11
Slika 13. Postupci sabijanja sirovca [15] .....	14
Slika 14. Presjek nuldimenzijskih nepravilnosti [9] .....	17
Slika 15. Bridna i vijčana dislokacija [9] .....	17
Slika 16. Dislokacijski zid [8] .....	18
Slika 17. Intrinška pogreška u slijedu mrežnih ravnina [8] .....	18
Slika 18. Granice kristalnih zrna [8] .....	19
Slika 19. Geometrija klizanja cilindričnog kristala [10] .....	20
Slika 20. Klizanje rubnih dislokacija [10] .....	20
Slika 21. Pozitivno i negativno penjanje [10] .....	21
Slika 22. Vrste dislokacijskih stepenica [10] .....	21
Slika 23. Ovisnost brzine dislokacije o primijenjenom tangencijalnom naprezanju [10] .....	22
Slika 24. Burgersov vektor i Burgersova petlja [11] .....	23
Slika 25. Grafički prikaz tvrdoća aluminijskih uzoraka sabijenih gravitacijskim batom .....	29
Slika 26. Grafički prikaz tvrdoća bakrenih uzoraka sabijenih gravitacijskim batom .....	30
Slika 27. Grafički prikaz tvrdoća aluminijskih uzoraka sabijenih hidrauličnom prešom .....	31
Slika 28. Grafički prikaz tvrdoća bakrenih uzoraka sabijenih hidrauličnom prešom .....	32
Slika 29. Razlika izmjerene tvrdoće HV 10 na sabijanim aluminijskim uzorcima s obzirom na brzinu deformacije, odnosno stroj na kojem se deformacija odvijala .....	33
Slika 30. Razlika izmjerene tvrdoće HV 10 na sabijanim uzorcima bakrene legure s obzirom na brzinu deformacije, odnosno stroj na kojem se deformacija odvijala. ....	33
Slika 31. Početno sučelje programa .....	34
Slika 32. Konstrukcija i izgled valjčića .....	35
Slika 33. Mreža konačnih elemenata .....	36
Slika 34. Krivulja tečenja aluminija (manja brzina) .....	39
Slika 35. Odabrana svojstva za aluminij .....	40
Slika 36. Zadani rubni uvjeti .....	41
Slika 37. Definirani malj, nakovanj i sirovac .....	42
Slika 38. Brzina gibanja hidraulične preše .....	43
Slika 39. Unos tablice brzine malja .....	44
Slika 40. Faktor trenja dodirnih površina .....	45
Slika 41. Određivanje kontaktnog međudjelovanja .....	45
Slika 42. Definiranje slučaja opterećenja .....	46
Slika 43. Odabir prikaza nakon simulacije .....	47
Slika 44. Način pokretanja simulacije .....	47
Slika 45. Prikaz prije pokretanja simulacije .....	48
Slika 46. Simulacija sabijanja aluminija hidrauličnom prešom .....	49



---

Slika 47. Simulacija sabijanja aluminija gravitacijskim batom .....	50
Slika 48. Simulacija sabijanja bakrene legure hidrauličnom prešom.....	51
Slika 49. Simulacija sabijanja bakrene legure gravitacijskim batom.....	52

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Rezultati ispitivanja gravitacijskim batom .....	25
Tablica 2. Rezultati ispitivanja hidrauličnom prešom.....	26
Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka sabijenih gravitacijskim batom .....	27
Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka sabijenih hidrauličnom prešom .....	28
Tablica 5. Krivulja tečenja aluminijskog (manja brzina).....	36
Tablica 6. Krivulja tečenja aluminijskog (veća brzina) .....	37
Tablica 7. Krivulja tečenja za bakar (mala brzina) .....	37
Tablica 8. Krivulja tečenja za bakar (velika brzina) .....	38
Tablica 9. Tablica vrijeme/brzina za hidrauličnu prešu .....	42
Tablica 10. Tablica vrijeme/brzina za gravitacijski bat .....	43

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$		koeficijent ovisan o razlici modula smicanja te o razlici polumjera atoma između osnovnog i legirnog elementa
$A$	$\text{mm}^2$	površina poprečnog presjeka materijala
$a$		koeficijent interakcije između postojećih i novih dislokacija
$a_0$	mm	početna dužina tijela
$a_1$	mm	konačna dužina tijela
$b_0$	mm	početna širina tijela
$b_1$	mm	konačna širina tijela
$b$		burgersov vektor
$c$		atomna koncentracija legirajućeg elementa
$d$	mm	promjer materijala
$D_Z$	mm	promjer zrna
$E$	$\text{N/mm}^2$	modul elastičnosti
$F$	N	deformacijska sila sabijanja
$G$	$\text{N/mm}^2$	modul smicanja
$h$	mm	visina materijala
$h_0$	mm	početna visina tijela
$h_1$	mm	konačna visina tijela
$k_f$	$\text{N/mm}^2$	naprezanje plastičnog tečenja
$K$	$\text{N/mm}^{-3/2}$	koeficijent djelovanja granice zrna
$l$	m	duljina dislokacijske linije
$m$	-	faktor orijentacije
$n$		eksperimentalno pronađena konstanta
$p_{sr}$	$\text{N/mm}^2$	srednja veličina tlaka
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	vlačna čvrstoća
$(\Delta R_e)_M$	$\text{N/mm}^2$	rast granice razvlačenja kod očvršnuća kristalima mješancima
$(\Delta R_e)_{Pr}$	$\text{N/mm}^2$	rast granice razvlačenja kod precipitacijskog očvršćivanja
$(\Delta R_e)_Z$	$\text{N/mm}^2$	rast granice razvlačenja kod očvršćivanja granicama zrna
$t$	s	vrijeme trajanja sabijanja
$v$	m/s	brzina deformacije
$v$	mm/s	brzina gibanja malja
$V_0$	$\text{mm}^3$	Početni volumen tijela
$V_1$	$\text{mm}^3$	Konačni volumen tijela
$\varepsilon$	mm/mm	Deformacija
$\lambda$	nm	međusobna udaljenost središta precipitiranih čestica
$\mu$	-	faktor kontaktnog trenja
$\rho$	$\text{mm/mm}^3$	gustoća dislokacija

---

$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	prividno (inženjersko) naprezanje
$\sigma_E$	$\text{N/mm}^2$	granica elastičnosti
$\sigma_P$	$\text{N/mm}^2$	granica proporcionalnosti
$\sigma_T$	$\text{N/mm}^2$	granica tečenja
$\tau$	$\text{N/mm}^2$	smično naprezanje
$\tau_0$	$\text{N/mm}^2$	smično naprezanje za $v = 1 \text{ m/s}$
$\tau_{max}$	$\text{N/mm}^2$	maksimalno smično naprezanje
$\Delta\tau_D$	$\text{N/mm}^2$	povećanje smičnog napreznja
$\varphi_a$		logaritamski stupanj deformacije dužine tijela
$\varphi_b$		logaritamski stupanj deformacije širine tijela
$\varphi_h$		logaritamski stupanj deformacije visine tijela

**SAŽETAK**

U ovom radu opisano je sabijanje aluminijskih i bakrenih valjčića na hidrauličnoj preši i gravitacijskom batu, te utjecaj sabijanja (hladne plastične deformacije) na tvrdoću metalnog materijala. Opisani su osnovni principi oblikovanja metala deformiranjem kao što su temeljni zakoni deformiranja, plastično tečenje materijala i mehanizmi očvršćavanja materijala. Također naglasak je stavljen i na vrstu te brzinu gibanja dislokacija, opis smjera i dimenzija gibanja dislokacija te gustoću dislokacija.

U eksperimentalnom dijelu rada sabijeni su aluminijski i bakreni valjčići prvo na gravitacijskom batu pa na hidrauličnoj preši. Sveukupno je obavljeno po 5 sabijanja valjčića radi postizanja različite visine sabijanja na svakom od strojeva. Nakon sabijanja mjerila se tvrdoća uzoraka kako bi se pokazao utjecaj stupnja deformacije na tvrdoću. Svi rezultati prikazani su tablično i grafički. S obzirom na razliku u brzini deformiranja na batu i na preši, napravljena je usporedba promjene tvrdoće materijala u ovisnosti o brzini deformiranja.

Koristeći MSC Marc Mentat program napravljena je simulacija sabijanja kako bi se utvrdio raspored naprezanja i utjecaj različite brzine deformacije na raspored i iznos naprezanja pojedinog materijala. Također uspoređeni su rezultati na hidrauličnoj preši i gravitacijskom batu.

Ključne riječi: sabijanje, valjčić, deformacija, tvrdoća, simulacija

---

**SUMMARY**

This thesis describes the compression of aluminum and copper cylinders using a hydraulic press and a gravity drop hammer, and the influence of compression (cold plastic deformation) on the hardness of the metal material. The basic principles of metal forming are described, such as basic laws of deformation, plasticity of materials and mechanisms of material hardening. Emphasis is also placed on the type and speed of dislocation movement, description of the direction and dimensions of dislocation movement and dislocation density.

In the experimental part, aluminum and copper cylinders were compressed first on a gravity drop hammer, and then on a hydraulic press. A total of 5 cylinder compaction were performed in order to achieve a different compaction height on each of the machines. After compression, the hardness of the samples was measured to show the influence of the degree of deformation on hardness. All the results are presented in tables and graphs. Considering the difference in the speed of deformation on the gravity drop hammer and hydraulic press, a comparison was made of the change in hardness of the material depending on the speed of deformation.

Using the MSC Marc Mentat program, a cylinder compression simulation was conducted to determine the stress distribution and the influence of different strain rates on the distribution and amount of stress of a particular material. The results on the hydraulic press and on the gravity drop hammer were also compared.

Key words: compression, cylinder, deformation, hardness, simulation

## **1. UVOD**

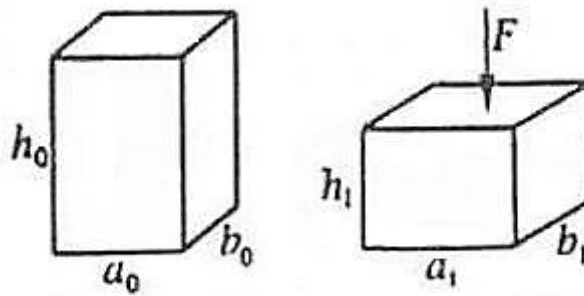
Oblikovanje deformiranjem je skupina metoda izrade proizvoda ili poluproizvoda baziranih na plastičnoj deformaciji, a krajnji cilj je izmjena dimenzija i oblika bez razaranja odnosno bez odvojenih čestica. Pripada u najstarije tehnike izrade oruđa i oružja još tijekom bakrenog doba. Međutim, značajni razvoj događa se dolaskom industrijalizacije, dok danas oblikovanje deformiranjem čini 85% cjelokupne proizvodnje čelika, dok u proizvodnji obojenih metala, legura nikla, bakra, cinka, kositra i olova iznosi preko 90%. Temeljni postupak koji vežemo uz oblikovanje deformiranjem je plastična deformacija. Do plastične deformacije dolazi nakon što djelovanje sile na materijal premaši granicu tečenja materijala. Promjene dimenzija uslijed djelovanja vanjskih sila izražavamo stupnjem deformacije. Razlikuju se hladna i topla plastična deformacija s obzirom na temperaturu procesa. S porastom temperature metala smanjuje se otpor kojim se metal opire deformaciji i olakšavaju se uvjeti obrade. Hoće li se proces obrade obavljati u hladnom ili toplom stanju ovisi o mnoštvo faktora kao što su: dimenzije, oblik i kvaliteta početnog materijala, stupanj složenosti konačnog komada, konstrukcija alata. Proces hladne plastične deformacije vrši se na temperaturama nižim od temperature rekristalizacije. Značajniji dio mehaničke energije uložene u hladnu deformaciju preobražava se u unutarnju energiju deformiranog materijala i alata što se zamjećuje njihovim povećanjem temperature, dok se ostatak energije pohrani kao energija naprezanja. Topla plastična deformacija provodi se na temperaturi iznad temperature rekristalizacije. Tehnike oblikovanja deformiranjem svoju upotrebu ponajprije pronalaze u industrijama metala, metaloprerađivačkoj industriji, avionskoj, automobilskoj i alatnoj. [1,2]

## 2. OSNOVNI PRINCIPI OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM

### 2.1. Deformacija

Deformacija podrazumijeva pomake čestica i dijelova iz početne pozicije s uvjetom da se kontinuitet i funkcionalnost tijela ne narušava. 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 prvotno stanje. Elastična deformacija se događa ako naprezanje ne pređe granicu elastičnosti. Plastična deformacija uzrokuje trajnu promjenu oblika i pozicija strukturalnih dijelova u odnosu na prvobitni oblik. [4]

Stupanj deformacije izražava promjenu dimenzija uslijed djelovanja vanjskih sila. Na slici 1 prikazano je sabijanje prizme početnih dimenzija  $a_0, b_0, h_0$ . Sabijanjem prizme dobivamo nove dimenzije  $a_1, b_1, h_1$  uz pretpostavku o konstantnosti volumena.



Slika 1. Promjena dimenzija prilikom deformiranja silom F [4]

Iz navedenih uvjeta slijedi:

$$V_0 = V_1 = \text{const.}$$

$$a_0 \cdot b_0 \cdot h_0 = a_1 \cdot b_1 \cdot h_1$$

$$\frac{a_0}{a_1} \cdot \frac{b_0}{b_1} \cdot \frac{h_0}{h_1} = 1$$

$$\ln \frac{a_0}{a_1} + \ln \frac{b_0}{b_1} + \ln \frac{h_0}{h_1} = 0 \rightarrow \varphi_a + \varphi_b + \varphi_h = 0 \quad (1)$$

U jednadžbi (1) prikazani su logaritamski stupnjevi deformacije ( $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_h$ ) a njihova suma je uvijek jednaka nuli, što znači da moraju postojati pozitivne i negativne deformacije, a općenito za deformacije vrijedi svojstvo aditivnosti. Kako je  $h_0 > h_1, a_0 < a_1, b_0 < b_1$  stupanj deformacije u pravcu visine bit će veći od nule ( $\varphi_h > 0$ ), dok će u pravcu visine i širine biti



manji od nule ( $\varphi_a < 0, \varphi_b < 0$ ). Prema tome, uzevši da kod deformacija imamo svojstvo aditivnosti može se pisati:

$$\varphi_h = -(\varphi_a + \varphi_b) \quad (2)$$

Jednadžba (2) govori nam da je stupanj deformacije u smjeru djelovanja sile  $\varphi_h$  apsolutno gledano maksimalan.

### **2.1.1. Temeljni zakoni deformiranja**

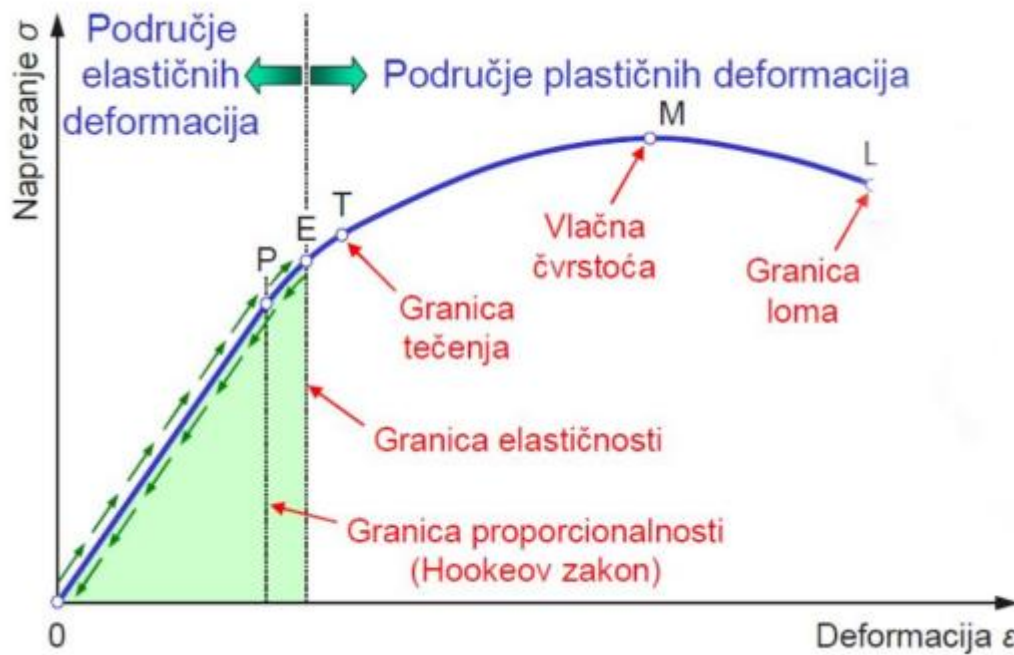
Poznavanje temeljnih zakona po kojima se odvijaju procesi oblikovanja deformiranjem omogućuje nam evaluaciju postupka deformacije koji se događa u materijalu.

Temeljni zakoni koji se koriste u procesima oblikovanja deformiranjem su: [1]

1. Zakon o konstantnom volumenu: 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).

### **2.1.2. Plastična deformacija**

Do deformacije, odnosno izmjene početnih dimenzija promatranog tijela dolazi prilikom djelovanja vanjskih sila. Veličina tih sila utječe hoće li doći do elastične ili plastične deformacije. Do plastične deformacije dolazi ako promatrano tijelo zadobi novi oblik, nakon što prestanu djelovati vanjske sile. [3]



Slika 2.  $\sigma - \varepsilon$  dijagram duktilnog materijala [5]

Na slici 2 prikazan je dijagram razvlačenja za duktilnog materijala. Dijagram kreće iz ishodišta Hookeovim pravcem za koji vrijedi Hookeov zakon koji glasi: [5]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

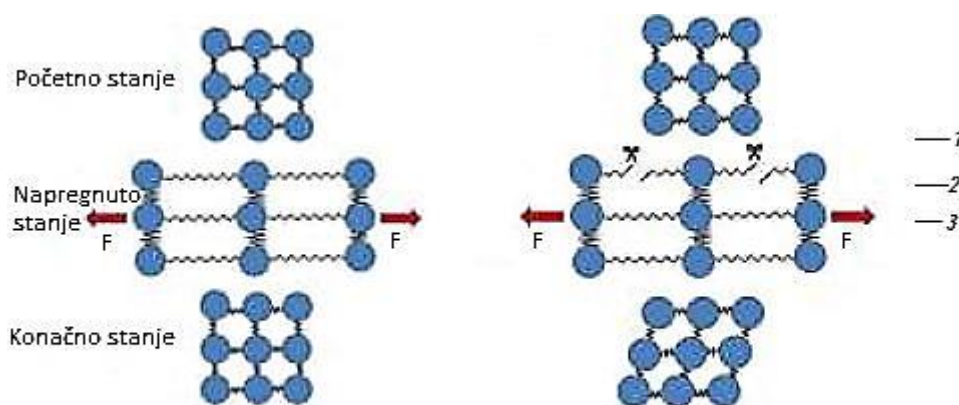
gdje je:

$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	napreznjanje
$E$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti
$\varepsilon$	mm/mm	deformacija

Što je modul elastičnosti  $E$  veći, za isto napreznjanje  $\sigma$  bit će manja deformacija, odnosno nagib Hookeovog pravca bit će položeniji, dok svako napreznjanje u području Hookeovog zakona izaziva samo elastičnu deformaciju materijala. Na slici točka P označava granicu proporcionalnosti ( $\sigma_P$ ) i do te točke vrijedi linearan odnos napreznjanja i deformacije. Granica elastičnosti ( $\sigma_E$ ) označena je točkom E i predstavlja ono najveće napreznjanje do kojega neće doći do plastične deformacije materijala. Granica tečenja ( $\sigma_T$ ) predstavlja ono napreznjanje kod kojeg se epruveta počinje produljivati bez povećanja napreznjanja. Vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) označava napreznjanje kod maksimalne sile te je ono osnovno svojstvo vrijednosti materijala prema mehaničkoj otpornosti. Napreznjanje kod kojeg dolazi do loma zove se konačno ili lomno napreznjanje. [6]

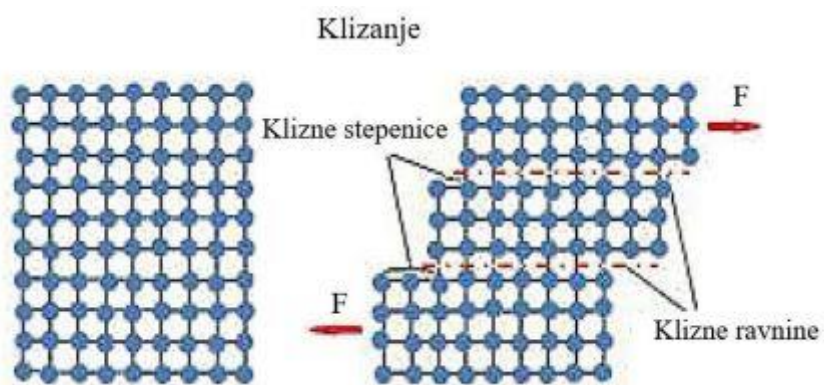
### 2.1.3. Deformacija monokristala

Ako postoji specifična kristalna rešetka u svakoj zoni metala, bez obzira na vanjski oblik onda se podrazumijeva monokristalna struktura. Prilikom mirovanja atoma sile privlačenja i odbijanja koje se nalaze između atoma kristalne rešetke se poništavaju. Djelovanjem vanjske sile ravnoteža se remeti te se atomi premještaju iz položaja ravnoteže. Do novog ravnotežnog položaja dolazi kada je sila izvana dovoljne jačine da se atomi, nakon rasterećenja, ne vraćaju u prethodni položaj. Dolazi do promjena dimenzija i oblika, uz konstantnost volumena što znači da je došlo do plastične deformacije. [1,3]



Slika 3. Elastična i plastična deformacija monokristala [1]

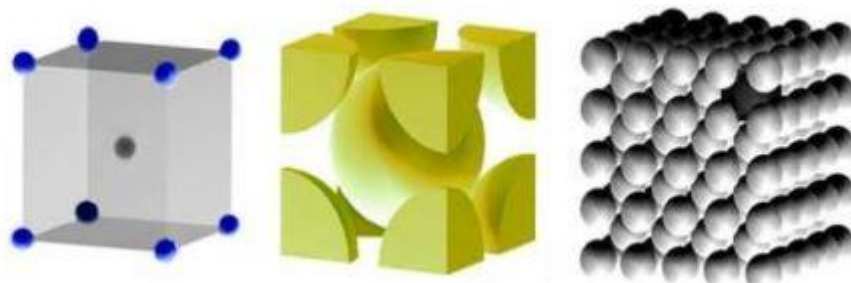
Plastična deformacija monokristala vrši se na dva načina: klizanjem ili blizančanjem. Kod klizanja se dijelovi kristala pomiču u određenom smjeru, a ravnine po kojima se atomi pomiču nazivaju se ravnine klizanja. Ravnine klizanja su one ravnine koje u sebi imaju najviše atoma u određenoj konfiguraciji. Smjer klizanja je određen pravcima u smjeru kojih je među atomski razmak najmanji. Smjer klizanja zajedno s ravninom klizanja čini klizni sustav. Sposobnost deformacije materijala određena je brojem kliznih sustava, a broj kliznih sustava definiran je tipom kristalne rešetke. Kod metala tri su najčešća tipa pravilne kristalne rešetke a to su : FCC, BCC i HCP. [1,3]



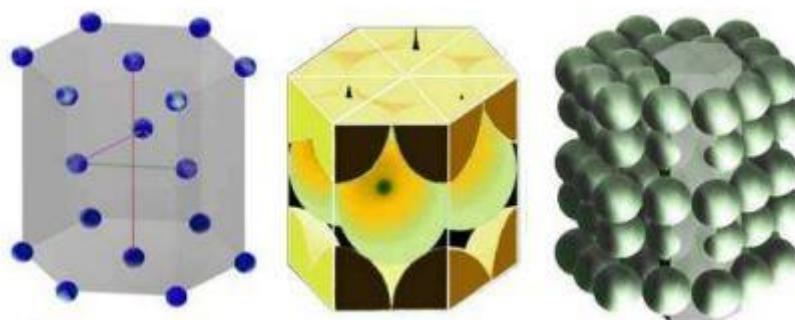
Slika 4. Klizanje [1]



Slika 5. Prostorno plošna kristalna rešetka – FCC [3]

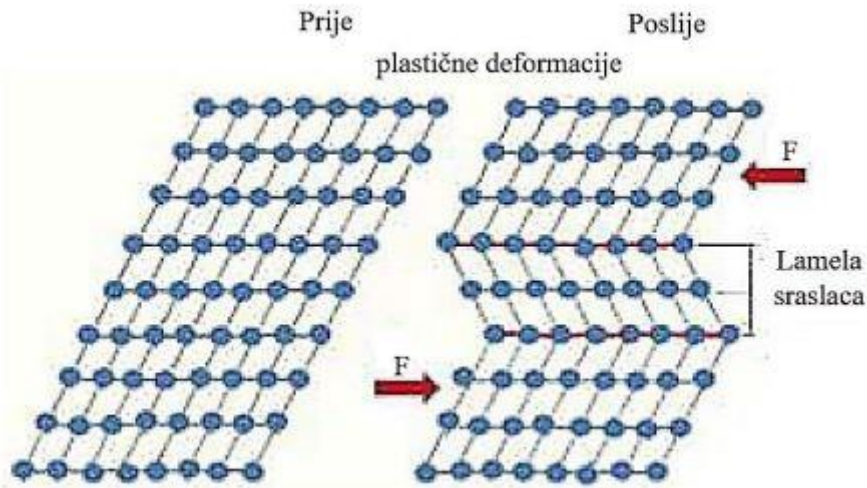


Slika 6. Prostorno centrirana kristalna rešetka – BCC [3]



Slika 7. Heksagonalna kristalna rešetka – HCP [3]

Do blizančanja dolazi kada smična naprezanja dosegnu kritičnu vrijednost, dok se horizontalni slojevi kristala pomiču proporcionalno udaljenosti od ravnine blizančenja. Za razliku od klizanja, blizančanje se često javlja prilikom dinamičkih opterećenja. [1]

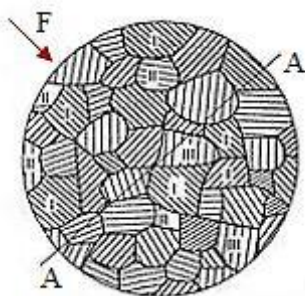


Slika 8. Blizančanje ili srastanje [1]

#### 2.1.4. Deformacija polikristala

Za razliku od spomenutih monokristala koji se koriste samo za znanstvena istraživanja, materijali koji se koriste u industriji su uvijek polikristalini. Polikristalna struktura sastoji se od više kristalnih zrna različite orijentacije koji u sebi imaju greške. Kod polikristala deformacija može biti transkristalna ili interkristalna. Transkristalna deformacija uključuje gibanje atoma u svakom pojedinom zrnu, a interkristalna deformacija podrazumijeva gibanje zrna unutar polikristalne strukture. Način deformiranja kristalnog zrna isti je kao i kod deformiranja monokristala, to jest plastična deformacija može se izvršiti klizanjem ili blizančenjem. Interkristalna deformacija se javlja kod metala koji imaju manje čvrstih granica dok se transkristalna deformacija javlja kod metala koji imaju čvrste granice zrna. Do plastične deformacije prvo dolazi u onim kristalnim zrnima koja su opterećena na maksimalno smično naprezanje, a to su zrna na koje sila  $F$  djeluje pod kutom  $45^\circ$ . Na slici 9 to su ona zrna čije su klizne ravnine paralelne s ravninom A-A.[1,3,4]



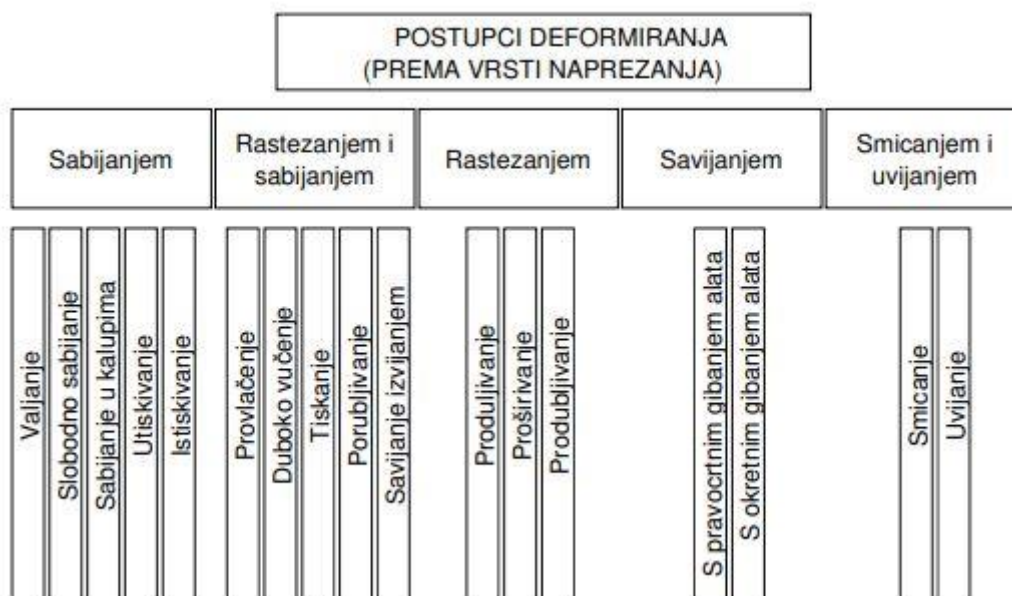


**Slika 9. Različita orijentacija ravnina klizanja u zrnima polikristala [1]**

Također granice kristalnih zrna se smatraju preprekama tijekom gibanja dislokacija i mjesta su koncentracije nepravilnosti kristalne rešetke, što kao posljedicu ima da su polikristalni materijali manje deformabilni od monokristalnih. Shodno tome, zbog toga što granice zrna funkcioniraju kao prepreke gibanju dislokacija, struktura s manjim kristalnih zrnima pruža veći otpor plastičnoj deformaciji. [3]

## 2.2. Podjela postupaka oblikovanja deformiranjem

Podjela postupaka oblikovanja deformiranjem provodi se na temelju sljedećih kriterija: vrsta naprezanja, temperatura, sredstvo kojim se vrši deformiranje te oblik proizvoda. Prema vrsti naprezanja razlikujemo sabijanje, rastezanje i sabijanje, rastezanje, savijanje te smicanje i uvijanje (slika 10). [3]



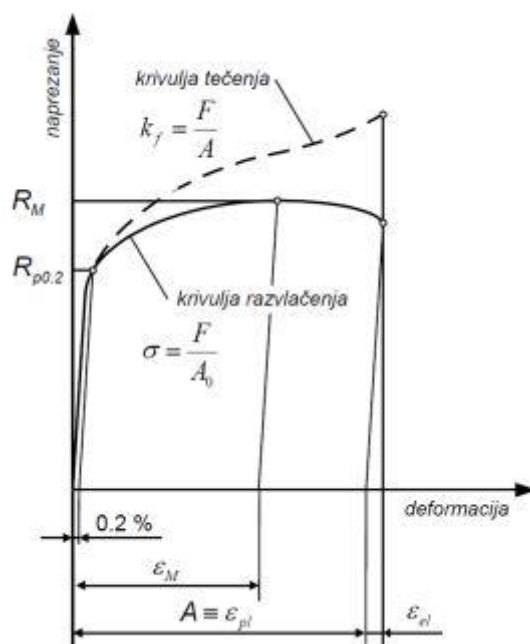
**Slika 10. Podjela postupaka deformiranje prema vrsti naprezanja [3]**

### 2.3. Plastično tečenje materijala

Mehaničke karakteristike materijala pretežno se dobivaju eksperimentalnim putem, vlačnim i tlačnim ispitivanjem probnih epruveta. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja bit će iskazani  $\sigma - \varepsilon$  dijagramima. Važno je istaknuti da kod plastične deformacije više ne postoji pravocrtna veza između naprezanja i deformacije kao što je to slučaj za elastične deformacije (Hookeov zakon, jednačba (3)). Tečenje materijala zapravo znači prijelaz iz elastičnog u plastično područje i zadržavanje u tom području. Dijelovi u praksi najčešće su opterećeni u uvjetima ravninskog ili prostornog stanja naprezanja. U takvim slučajevima, kada je tijelo opterećeno recimo troosnim stanjem naprezanja, plastično tečenje će nastupiti pod drugačijim okolnostima nego kad je tijelo linearno opterećeno. Principe ponašanja materijala pri jednoosnom i ostalim stanjima naprezanja predstavljaju teorije o plastičnom tečenju. Teorije o plastičnom tečenju materijala na osnovu rezultata jednoosnih eksperimenata predviđaju ponašanje materijala u uvjetima drugih stanja naprezanja. Normalno tlačno ili vlačno naprezanje kod kojeg dolazi do plastičnog tečenja zove se naprezanje plastičnog tečenja i označava se sa  $k_f$ , te je ono izravno povezano s maksimalnim smičnim naprezanjem preko jednačbe [3]:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} k_f \quad (4)$$

Jednačba (4) govori da će se plastična deformacija dogoditi kada smično naprezanje dostigne polovicu naprezanja plastičnog tečenja. Kada se govori o naprezanjima prilikom obrade deformiranjem, postoji razlika između stvarnog naprezanja ( $k_f$ ) i prividnog (inženjerskog) naprezanja ( $\sigma$ ). Stvarno naprezanje koristi se za određivanje plastičnog tečenja i ono ovisi o trenutnoj sili i površini tijela i dobiva se njihovim dijeljenjem, dok se prividno (inženjersko) naprezanje koristi za određivanje granice razvlačenja i ono se dobiva dijeljenjem trenutne sile i početne površine obratka (slika 11). [2,3]



Slika 11. Krivulja tečenja i razvlačenja [3]

Poznavanje naprezanja plastičnog tečenja i krivulja tečenja važno je za određivanje sila i rada deformiranja na temelju kojih se provodi izbor radnog stroja ali i pravilno konstruiranje i dimenzioniranje alata. Kod stvarnih procesa radi se o višeosnom stanju naprezanja pa tada početak plastičnog tečenja ovisi o kombinaciji naprezanja po osima. Postoje mnoge teorije, ali se za potrebe deformiranja metala najčešće koriste von Misesov ili Trescin uvjet tečenja.

### 2.3.1. Uvjet plastičnog tečenja

Kao što je već rečeno, u realnim procesima gotovo uvijek se radi o višeosnom stanju naprezanja te se zbog toga danas koriste dvije teorije za znanost o čvrstoći i oblikovanja metala deformiranjem: [2]

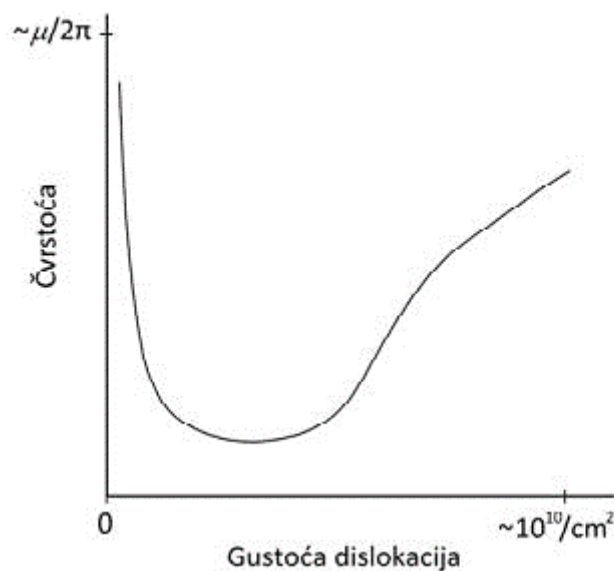
1. Teorija najvećih smičnih naprezanja: Trescina teorija govori da će do deformacije doći kada vrijednost najvećeg smičnog naprezanja  $\tau_{max}$  u uvjetima složenog napregnutog stanja dosegne vrijednost  $\tau_{max}$  u jednoosnom napregnutom stanju kod kojeg će doći do trajne deformacije.
2. Teorija najveće distorzijske energije: Von Misesova teorija govori da će do deformacije doći kada je energija plastične deformacije akumulirana pri promjeni oblika u uvjetima složenog troosnog stanja naprezanja jednaka energiji pri promjeni oblika kod pretpostavljenog aksijalnog opterećenja, a kod kojeg će doći do trajne deformacije.



## 2.4. Mehanizmi očvršćivanja materijala

### 2.4.1. Deformacijsko očvršćivanje

Temelj deformacijskog očvršćivanja je povećanje gustoće dislokacija, pri čemu se dislokacije ometaju u gibanju što rezultira porastom granice razvlačenja. Do klizanja odnosno ometanja u gibanju dolazi djelovanja polja naprezanja oko dislokacija, međudjelovanjem dislokacija s kojima se uzrokuje usidranje dislokacija, te prodiranjima jednog kliznog sustava u drugi, pri čemu nastaju stube, tj. prijelomi u dislokacijama. Ako je gustoća dislokacija tolika da su razmaci između atoma i razmaci između dislokacija jednaki postiže se gornja granica očvršćavanja pri čemu može doći do napuklina ili loma. Maksimalne vrijednosti ostvaruju se za vrlo velik ili vrlo mali broj dislokacija. Broj dislokacija kod niske vrijednosti čvrstoće iznosi  $10^3 - 10^5 \text{ cm/cm}^3$  dok kod visokih vrijednosti čvrstoće broj dislokacija iznosi  $> 10^{10} \text{ cm/cm}^3$ . [12, 13]



Slika 12. Ovisnost čvrstoće metala o gustoći lokacija [12]

Povećanje smičnog naprezanja zbog većeg broja dislokacija računa se kao: [14]

$$\Delta\tau_D = a \cdot m \cdot G \cdot b \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Gdje je:

$a$  - koeficijent interakcije između postojećih i novih dislokacija

$m$  - faktor orijentacije

$G$  N/mm<sup>2</sup> Modul smicanja

$b$  - Burgersov vektor  
 $\rho$  mm/mm<sup>3</sup> Gustoća dislokacija

#### 2.4.2. Očvršćavanje kristalima mješancima

Temelj ovog očvršćavanja je postojanje legirnih elemenata koji deformiranjem stvaraju točkaste ili nul-dimenzijske prepreke i tako otežavaju gibanje dislokacija. Otopljeni atomi legirnih elemenata u osnovnom metalu stvaraju intersticijske ili supstitucijske kristale mješance. Supstitucijski atomi poboljšavaju čvrstoću i žilavost, dok intersticijski atomi poboljšavaju čvrstoću no smanjuju žilavost. Razlika atoma osnovnog metala i otopljenih atoma je u krutosti, veličini i električnom naboju te zbog toga nasumično raspoređeni atomi legirnih elemenata prilikom dodira s dislokacijama uzrokuju očvršćavanje jer otežavaju gibanje dislokacija. [13]

Rast granice razvlačenja računa se prema izrazu: [13]

$$(\Delta R_e)_M = A \cdot G \cdot c^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Gdje je:

$A$  - koeficijent ovisan o razlici modula smicanja te o razlici polumjera atoma između osnovnog i legirnog elementa

$G$  N/mm<sup>2</sup> Modul smicanja

$c$  - Atomna koncentracija legirajućeg elementa

#### 2.4.3. Precipitacijsko očvršćivanje

Temelj precipitacijskog očvršćivanja je sprečavanje gibanja dislokacija pomoću submikroskopskih čestica (karbidi, nitridi, karbonitridi) koje se nalaze u strukturi osnovnog materijala i nalaze se na razmacima od 15-45 nm. Prva legura nastala precipitacijskim očvršćivanjem zove se „duraluminij“ i masovnu eksploataciju pronašla je prilikom Prvog svjetskog rata gdje se koristila za proizvodnju zračnog broda i borbenih zrakoplova. Iako i čvrstoća i tvrdoća rastu s vremenom i veličinom čestica starenja, nakon nekog vremena moguće je da dolazi do smanjivanja tvrdoće i čvrstoće. [12, 13, 14]

Rast granice razvlačenja računa se prema izrazu: [14]

$$(\Delta R_e)_{Pr} = \frac{3 \cdot G \cdot b}{\lambda} \quad (7)$$

Gdje je:

$G$  N/mm<sup>2</sup> Modul smicanja

$b$  - Burgersov vektor

$\lambda$  nm Međusobna udaljenost središta precipitiranih čestica

#### 2.4.4. Očvršćivanje granicama zrna

Temelj očvršćivanja granicama zrna je smanjivanje pokretljivosti dislokacija pomoću granica zrna koje predstavljaju svojevrsnu barijeru. Rast čvrstoće je umjeren i ne ubraja se u najdjelotvornije mehanizme očvršćavanja. Djelovanje granica zrna bolje je od drugih zapreka jer je broj dislokacija ograničen, pa prije nego se na granicama zrna dostigne kritična veličina nakupljanja, dolazi do procesa klizanja preko granice u drugo zrno samo ako je ono povoljno orijentirano. [12, 14]

Mehanizam očvršćivanja granicama zrna može se prikazati preko jednadžbe: [14]

$$(\Delta R_e)_Z = K \cdot (D_Z)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

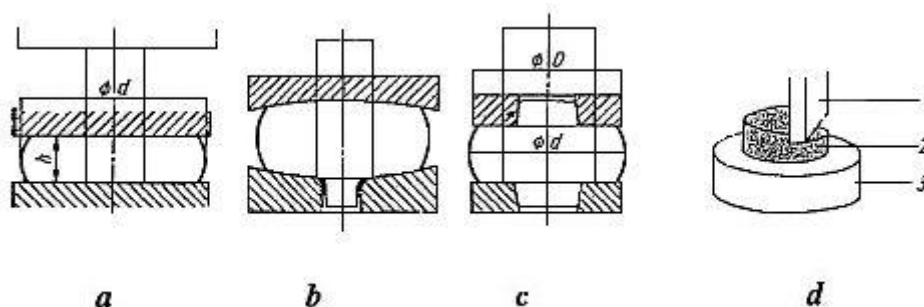
Gdje je:

$K$  N/mm<sup>-3/2</sup> koeficijent djelovanja granice zrna

$D_Z$  mm promjer zrna

### 3. SABIJANJE MATERIJALA

Sabijanje je postupak koji djelovanjem aksijalne sile smanjuje visinu, a povećava poprečni presjek sirovca. Dolazi do slobodnog tečenja materijala u radijalnom smjeru, volumen ostaje konstantan te također dolazi do bačvanja zbog djelovanja trenja između alata i materijala. Sabijanje se dijeli na slobodno sabijanje i sabijanje u kalupima. Također postoji podjela na statičko i dinamičko sabijanje. Statičko sabijanje odvija se na prešama gdje su brzine deformiranja male, a na batovima se ostvaruje dinamičko sabijanje jer su brzine deformiranja velike. [15, 16]



Slika 13. Postupci sabijanja sirovca [15]

Na slici 13 prikazani su postupci sabijanja s različitim oblicima tlačnih ploha. Slučaj „a“ prikazuje malj i nakovanj koji ravnim plohama sabijaju sirovac. Ovakav postupak najčešće se izvodi na hidrauličnim prešama i batovima. Slučaj „b“ prikazuje sabijanje pomoću zakrivljenih ploha. Izrađuje se otvorom na plohi nakovnja koji služi za prihvat manipulatora ili nekog sličnog uređaja. Slučaj „c“ prikazuje sabijanje sirovca ali uz dva izdanka. Slučaj „d“ prikazuje djelomično sabijanje sirovca (2) s prizmatičnim maljem (1) i okruglim nakovnjem (3). Ovakav slučaj koristi se kada imamo prešu nedovoljne deformacijske sile ili ako imamo kovački bat nedovoljne energije deformacije. Najčešće, kako bi se bačvanje eliminiralo kontaktne površine prilikom sabijanja se podmazuju kako bi se smanjio utjecaj trenja. [15]

#### 3.1. Utjecaj faktora trenja na sabijanje materijala

Intenzitet bačvanja kao i veličina deformacijske sile pod direktnim su utjecajem faktora kontaktnog trenja. Zbog nejednolike brzine deformacije i mijenjanja temperature prilikom sabijanja u toplom stanju teško je odrediti točan faktor kontaktnog trenja, nego se u praksi koristi prosječni faktor kontaktnog trenja. Prosječni faktor kontaktnog trenja koristi se i prilikom određivanja deformacijske sile sabijanja preko izraza:

$$F = p_{sr} \cdot A \quad (9)$$

Gdje je:

$p_{sr}$  N/mm<sup>2</sup> Srednja veličina tlaka

$A$  mm<sup>2</sup> Površina poprečnog presjeka materijala

Srednja veličina tlaka za površinu kružnog presjeka dobije se preko izraza:

$$p_{sr} = k_f \cdot \left(1 + \mu \cdot \frac{d}{3h}\right) \quad (10)$$

Gdje je:

$k_f$  N/mm<sup>2</sup> Naprezanje plastičnog tečenja

$\mu$  - Faktor kontaktnog trenja

$d$  mm Promjer materijala

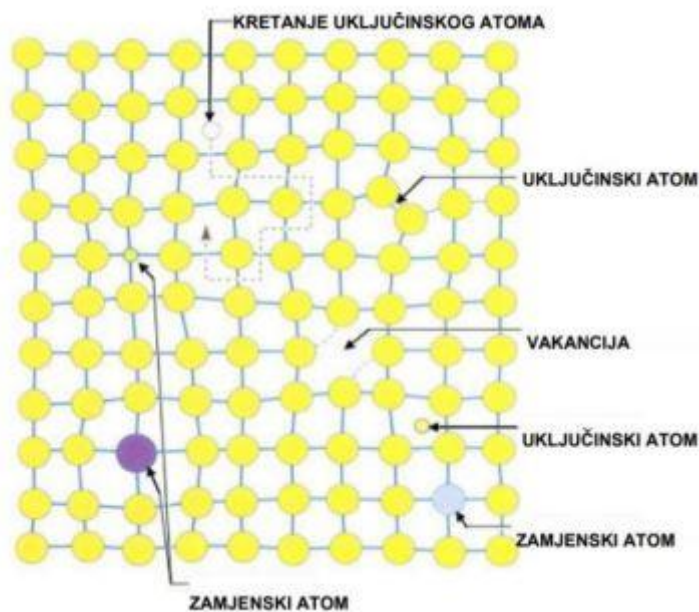
$h$  mm Visina materijala

Poznavanje izraza (9) i (10) pomaže nam prilikom izračuna sile sabijanja što nam koristi prilikom izbora preše za sabijanje ili kako bi se izračunao rad deformacije ako se sabijanje obavlja na batu. [15]

#### 4. TEORIJA DISLOKACIJA

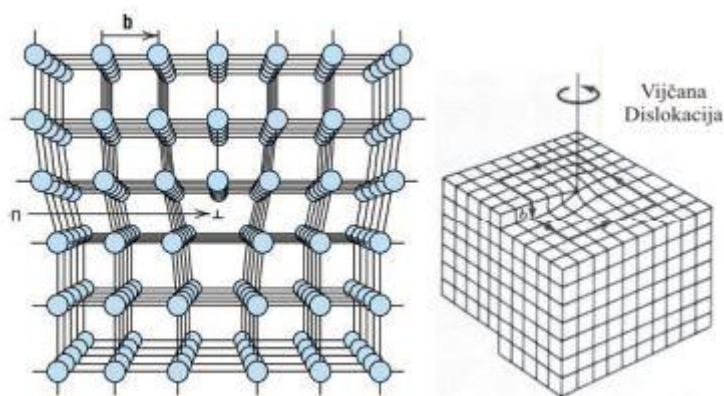
U teoretskim razmatranjima, za čiste metale pretpostavlja se da imaju pravilno građenu kristalnu rešetku, dok metali korišteni u praksi nisu savršeni i nemaju idealnu kristalnu rešetku nego sadrže defekte ili nepravilnosti. Nepravilnosti se još nazivaju i nesavršenosti rešetke i mogu biti razmještene geometrijski, linijski, površinski ili prostorno. Toplinska i električna vodljivost, mehanička i magnetska kao i ostala makroskopska svojstva realnih metalnih materijala jedino se mogu objasniti prisustvom defekata u kristalima. Nesavršenosti kristalne strukture dijelimo na statičke i dinamičke. Dinamičke nesavršenosti nastaju pobuđivanjem kristalne rešetke dok statičke nastaju kod stvaranja kristalne rešetke ili kod kasnijih postupaka. Statički defekti dijele se na točkaste, linijske, površinske ili prostorne. [7,8,9]

Nuldimenzijske (točkaste) nepravilnosti zauzimaju mjesto jednog atoma u kristalnoj rešetci, a dijele se na: vakancije ili praznine, supstitucijski ili zamjenski atomi te na intersticijske ili uključinske atome. Vakancije ili praznine nastaju kada se osnovnoj kristalnoj rešetci atom nalazi u međuprostoru ili kada atom nedostaje (vakancija) i preko njih se u najvećoj mjeri odvija difuzija atoma. Praznine nastaju kada atom odlazi iz svog mjesta u rešetci na površinu i ostavlja prazno mjesto. Atom na površini i praznina poznatiji su pod nazivom Schottkyev defekt. Također praznina može nastati ako uključinski atom nastane pomakom vlastitog atoma iz osnovnog položaja i tu ostaje praznina te dobivamo Frenkelov defekt. Zagrijavanjem metala broj praznina se povećava te se povećava i električni otpor jer praznine narušavaju homogenost elektronskog oblaka. Intersticijski atomi su oni atomi koji su osjetno manji od atoma osnovne rešetke te se oni mogu postaviti u slobodne prostore (intersticije) između atoma osnovne rešetke. Ako su intersticijski atomi veći dolazi do razmicanja susjednih atoma, odnosno ako su intersticijski atomi manji dolazi do skupljanja. Supstitucijski ili zamjenski atomi su oni atomi koji se postavljaju umjesto atoma osnovne rešetke i njihova veličina slična je veličini atoma kojeg zamjenjuju. [7,8,9]



**Slika 14. Presjek nuldimenzijskih nepravilnosti [9]**

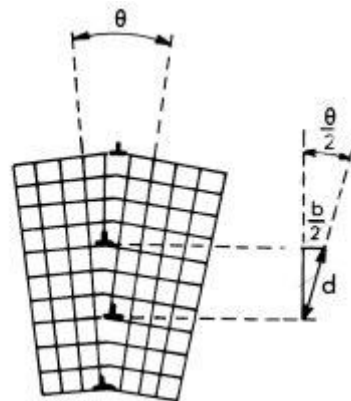
Linijske nepravilnosti su zapravo dislokacije i njima u nizu nedostaju atomi. Duljina dislokacije doseže nekoliko stotina parametara rešetke a dijeli se na kutnu i vijčanu. Može započeti ili okončati na površini materijala te također može formirati zatvorenu liniju u unutrašnjosti. Linijske nepravilnosti utječu na mehanička svojstva materijala, pogotovo na plastičnu deformaciju. Vijčana dislokacija nastaje spiralnim rastom kristala, a od kutne se razlikuje po tome što je kutna dislokacija okomita na pravac klizanja, a vijčana paralelna na smjerom smicanja. [7,8,9]



**Slika 15. Bridna i vijčana dislokacija [9]**

Dvodimenzijske nepravilnosti nastaju kad se dogodi prekid idealne periodičnosti kristalne rešetke unutar samog kristala. Dije se na dislokacijske zidove, pogreške u slijedu mrežnih

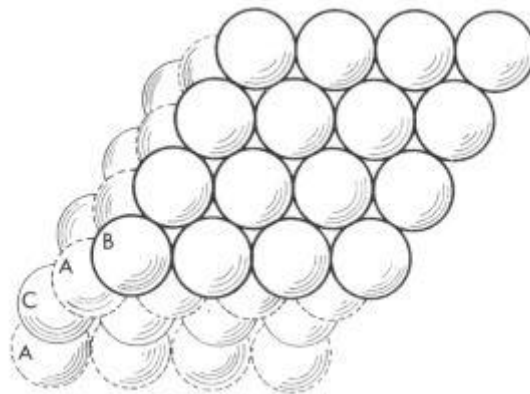
ravnina i granice kristalnih zrna. Dislokacijski zidovi se javljaju kada se pomicanjem i raspodjelom dislokacija u zid želi smanjiti deformacijska elastična energija u kristalu.



**Slika 16. Dislokacijski zid [8]**

Na slici 16 prikazan je dislokacijski zid i kao što je vidljivo ravnine su u blizini dislokacijskog zida zakrivljene, dok dalje od zida zakrivljenost prestaje. Ako je kut  $\theta$  veći od  $15^\circ$  onda se više ne radi o dislokacijskom zidu nego o granicama kristalnih zrna.

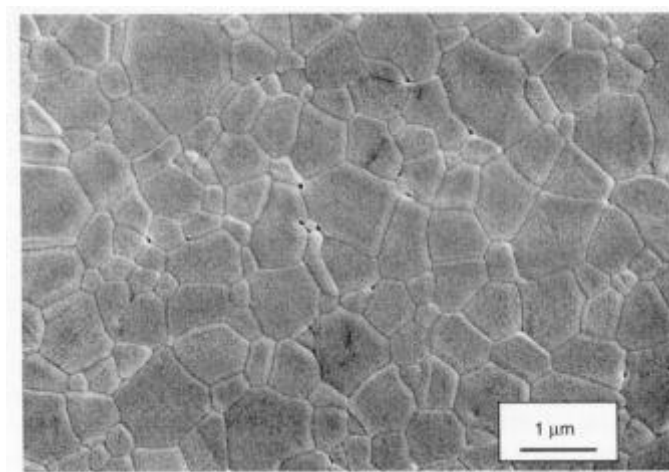
Pogreške u slijedu mrežnih ravnina nastaju kada ravnina atoma nedostaje (intrinska pogreška) ili kada se ravnina dodaje (ekstrinska pogreška). Intrinska pogreška u slijedu mrežnih ravnina prikazana je na slici 17 na kojoj je vidljivo da nedostaje ravnina B između ravnina A i C.



**Slika 17. Intrinska pogreška u slijedu mrežnih ravnina [8]**

Granica kristalnih zrna je granica između područja iste faze i različite orijentacije kristala. Ako su kristalna zrna od različitih materijala onda su granice međufazne. Također razlikujemo širokokutne granice kristalnih zrna (kut veći od  $15^\circ$ ) i uskokutne granice kristalnih zrna (kut manji od  $15^\circ$ ). Uskokutne granice kristalnih zrna razlikuju se od dislokacijskog zida po tome što unutar uskokutnih granica postoji neuređen raspored atoma.





**Slika 18. Granice kristalnih zrna [8]**

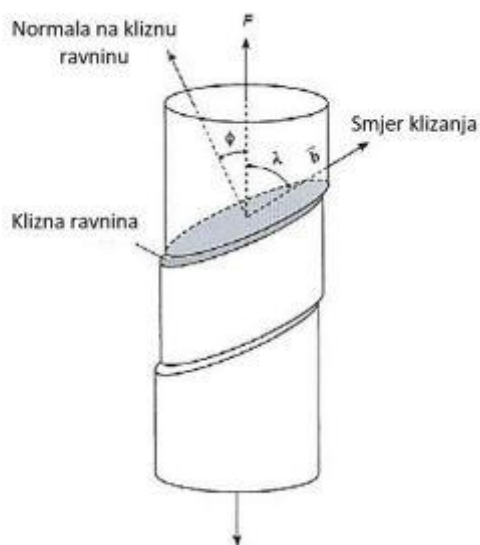
Na slici 18 prikazane su granice kristalnih zrna za korund na kojoj je vidljivo da su granice kristalnih zrna zakrivljene. Granice kristalnih mogu se pomicati tako da jedno zrno raste a račun drugoga i to se događa na visokim temperaturama.

Trodimenzijske (volumne) nepravilnosti su makro nepravilnosti kristalne strukture a mogu nastati prilikom postupaka izrade ili toplinske obrade. To su primjerice pore, uključine, zaostali mjehurići plina ili zraka tijekom skrućivanja taljevine. [7,8,9]

#### **4.1. Gibanje dislokacija**

Osnovni mehanizmi gibanja dislokacija su klizanje i penjanje. Klizanje se događa kada se dislokacija kreće po površini koja sadrži Burgersov vektor i dislokacijsku liniju. Penjanje se događa kada se dislokacija giba na taj način da „izlazi“ iz ravnine klizanja okomito na Burgersov vektor.

Klizanje se može zamisliti kao pomicanje jedne ravnine atoma preko druge na ravninama klizanja. Ono rezultira stvaranjem stepenica na površini kristala koje se lako mogu primijetiti ako je površina pažljivo ispolirana prije plastične deformacije. Klizanje se odvija pri niskim temperaturama zbog otežane difuzije, te tada imamo neuravnoteženu koncentraciju točkastih defekata. To je razlog zašto je kretanje dislokacija u tim uvjetima ograničeno samo na klizanje. Ravnine klizanja su one ravnine koje imaju najgušći raspored atoma.

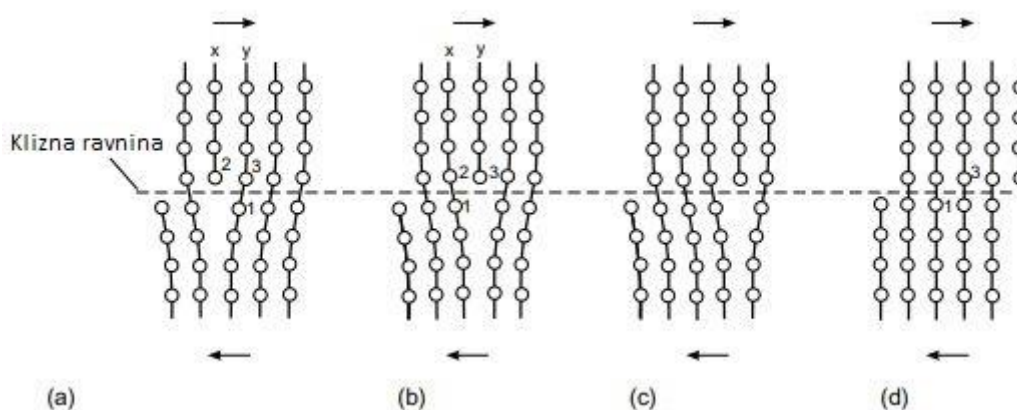


**Slika 19. Geometrija klizanja cilindričnog kristala [10]**

Prema slici 19 izraz za tangencijalno naprezanje koje je najzaslužnije za klizanje dislokacija iznosi:

$$\tau = \frac{F}{A} \cos\phi \cos\lambda \quad (11)$$

Teorijski dobiven iznos tangencijalnog naprezanja klizanja je puno veći od eksperimentalno dobivenog iznosa. Niska vrijednost tangencijalnog naprezanja povezana je s prisutnošću dislokacija jer je za klizanje dislokacija dovoljna mala vrijednost tangencijalnog naprezanja.

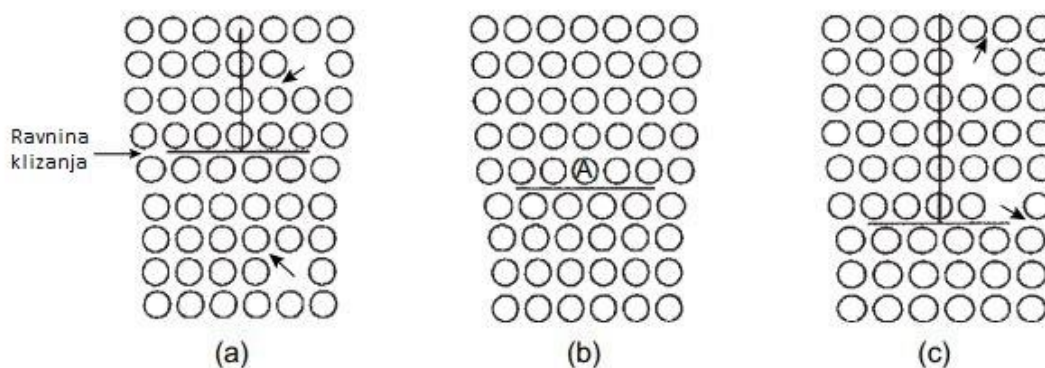


**Slika 20. Klizanje rubnih dislokacija [10]**

Na slici 20 prikazano je klizanje rubnih dislokacija, odnosno plastična deformacija, pri čemu strelice pokazuju smjer primijenjenog tangencijalnog naprezanja. Mali pomak atoma 1 u odnosu na atome 2 i 3 (a) učinkovito pomiče poluravninu od x do y (b). Taj proces se ponavlja

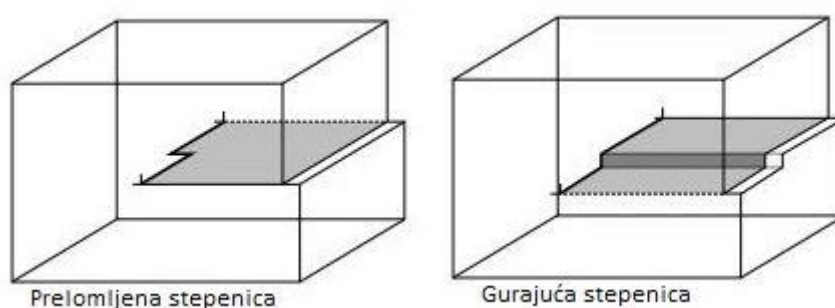
kako dislokacija nastavlja kliziti (c) i (d). U blizini dislokacija udaljenost između atoma nije idealna stoga je potrebna samo mala promjena položaja atoma da bi se dislokacija pokrenula.

Penjanje, za razliku od klizanja, događa se na povišenim temperaturama.



**Slika 21. Pozitivno i negativno penjanje [10]**

Na slici 21 prikazano je pozitivno i negativno penjanje linijske dislokacije. Ako se red atoma A ukloni, dislokacijska linija se pomiče jedan atom razmaka od svoje izvorne ravnine klizanja i to se zove pozitivno penjanje (a). Sukladno tome ako se niz atoma dodaje dislokacijska linija se pomiče prema dolje za jedan atom razmaka i to se zove negativno penjanje (c). Također treba zamijetiti da se ne popne ili spusti cijeli red atoma jer dislokacijska linija nije ravna nego se sastoji od dislokacijskih stepenica. Pozitivno i negativno penjanje odvija se djelomično po pojedinim dijelovima, pritom je za oduzimanje ili dodavanje atoma po dislokacijskim stepenicama potrebno manje energije nego po ravnoj liniji. Dvije su vrste dislokacijskih stepenica a to su gurajuće i prelomljene. Gurajuće se kreću s jedne ravnine klizanja na drugu a prelomljene se nalaze na istoj kliznoj ravnini. Vrste dislokacijskih stepenica prikazane su na slici 22. [8,10]



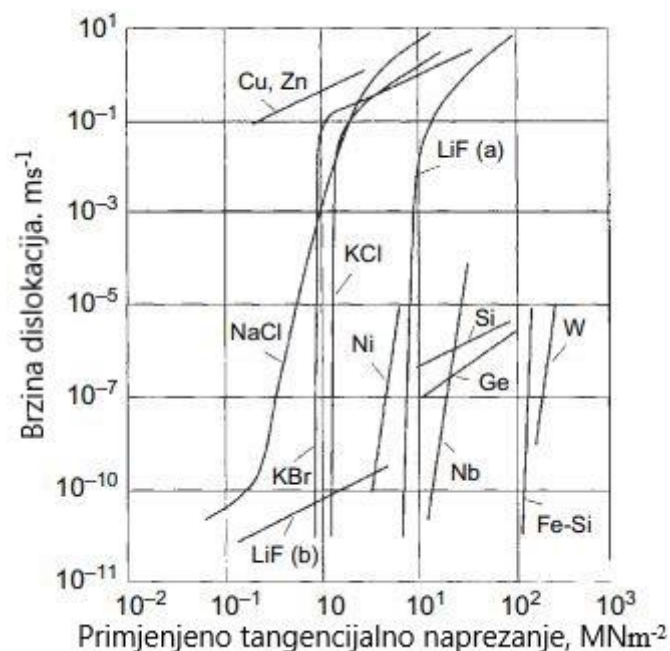
**Slika 22. Vrste dislokacijskih stepenica [10]**

## 4.2. Brzina gibanja dislokacija

Brzina klizanja dislokacija ovisi o primijenjenom smičnom naprezanju, čistoći kristala, temperaturi i vrsti dislokacije. Teorijski gledano, što je veća brzina gibanja dislokacija, to je deformabilnost materijala veća. Metoda određivanja brzine gibanja dislokacija razvijena je koristeći ugravirane jame da bi se otkrila pozicija dislokacije u različitim stanjima deformacije. Kristal koji sadrži dislokacije podvrgnut je konstantnom impulsnom opterećenju u određenom vremenu. Iz pozicije dislokacija prije i poslije impulsnog opterećenja može se dobiti udaljenost za koju se dislokacija pomaknula i prema tome prosječna brzina dislokacija. Ponavljajući ovu radnju mijenjajući iznos i vrijeme impulsnog opterećenja može se dobiti brzina u ovisnosti o opterećenju. [10]

$$v \sim \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^n \quad (12)$$

U jednadžbi (12)  $v$  označuje brzinu,  $\tau$  označuje primijenjeno tangencijalno naprezanje,  $\tau_0$  označuje tangencijalno naprezanje za  $v = 1$  m/s,  $n$  je eksperimentalno pronađena konstanta koja iznosi  $\sim 25$  za litijev fluorid. Jednadžba (12) je empirijska jednadžba i ne podrazumijeva fizičku interpretaciju dislokacijskog kretanja. U praksi se deformabilnost materijala definira i drugim parametrima koji su vezani za makroskopsku razinu i lakše ih je određivati u laboratorijskim i industrijskim uvjetima. [10]

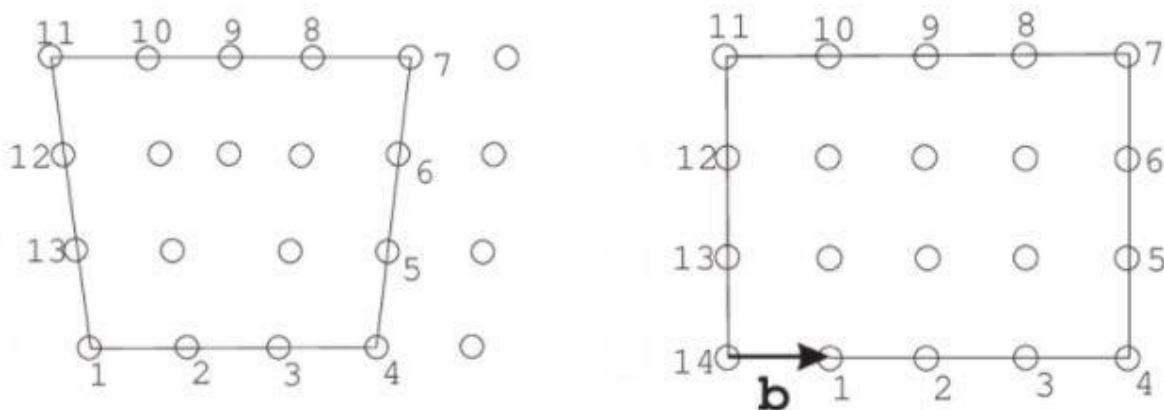


Slika 23. Ovisnost brzine dislokacije o primijenjenom tangencijalnom naprezanju [10]

Na slici 23 prikazana je ovisnost brzine dislokacije o primijenjenom tangencijalnom naprezanju za određene kemijske elemente i spojeve. Podaci su prikazani za temperaturu od 20°C izuzevši Ge (450°C) i Si (850°C). U većini slučajeva povećanjem tangencijalnog naprezanja povećava se i brzina dislokacija. [10]

### 4.3. Burgersov vektor

Burgersov vektor  $\vec{b}$  koristi se za opis smjera i dimenzija najvećih pomaka u kristalnoj rešetci čiji su uzrok dislokacije. Najbolji način određivanja Burgersovog vektora je pomoću Burgersovih petlji. Burgersova petlja je zapravo putanja koja ide od atoma do atoma s kojima zatvara petlju. Određuje se tako da se odredi početni atom te se oko dislokacije kruži tako da se zatvori petlja i izbroje se pomaci. S tim brojem pomaka ista stvar radi se i na kristalu koji je pravilan i ne sadrži nikakve nepravilnosti u svojoj strukturi. Nedostajući korak potreban da se zatvori petlja zove se Burgersov vektor.  $s^{-1}$



Slika 24. Burgersov vektor i Burgersova petlja [11]

Na slici 24 prikazana je Burgersova petlja za idealni kristal (lijevo) i kristal s dislokacijom (desno). Iznos vektora  $\vec{b}$  jednak je za vijčanu i bridnu dislokaciju i nije ovisan o Burgersovoj petlji. Dogovoreno je da vektor obilazi u smjeru kazaljke na satu. [8,10]

### 4.4. Gustoća dislokacija

Gustoća dislokacija  $\rho$  se određuje kao ukupna duljina dislokacijske linije po jedinici volumena kristala u jedinicama  $\text{cm}^{-2}$  ili  $\text{m}^{-2}$ . U volumenu  $V$  gdje imamo duljinu dislokacijske linije  $l$ , gustoća se računa kao:

$$\rho = \frac{l}{V} \quad (13)$$

---

Vrijednost gustoće obično se kreće od  $10^{10} \text{ m}^{-2}$  do  $10^{12} \text{ m}^{-2}$  i naglo raste s prisutnošću plastične deformacije na vrijednosti između  $10^{14}$  i  $10^{15} \text{ m}^{-2}$ . Obično je vrijednost gustoće manja kod nemetalnih kristala nego kod metalnih i može se postići vrijednost od  $10^5$  u poluvodičkim kristalima.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio sastoji se od sabijanja aluminijskih i bakrenih valjčića obavljenih na gravitacijskom batu i hidrauličnoj preši. Prema brzini deformiranja gravitacijski bat i hidraulična preša se značajno razlikuju. Brzina deformacije kod batova iznosi od  $50 \text{ s}^{-1}$  do  $160 \text{ s}^{-1}$ , dok kod hidrauličnih preša iznosi od  $1 \text{ s}^{-1}$  do  $5 \text{ s}^{-1}$ . Povećanjem brzine deformacije povećava se i naprezanje plastičnog tečenja, a deformabilnost opada. Utjecaj brzine deformacije znatno je veći kod oblikovanja u toplom stanju nego kod oblikovanja u hladnom stanju. Također, povećanjem stupnja deformacije povećava se i tvrdoća jer se dislokacije više ne mogu slobodno kretati. Kada se tvrdoća poveća sve teže je deformirati metal. [17]

Obavljeno je 5 sabijanja valjčića s različite visine na svakom od strojeva. Početne dimenzije valjčića bile su: promjer 20 mm i visina 25 mm. Kod gravitacijskog bata mjere se visina spuštanja malja i konačna dimenzija valjčića nakon sabijanja. Masa malja iznosila je 84 kg. Rezultati ispitivanja gravitacijskim batom prikazani su u tablici 1.

**Tablica 1. Rezultati ispitivanja gravitacijskim batom**

Materijal uzorka	Broj uzorka	Visina podizanja malja, m	Potencijalna energija malja, J	Brzina u trenutku sraza iz kinetičke energije, m/s	Konačna visina uzorka, mm	Logaritamski stupanj deformacije
Al	1-1	0,2	164,8	1,98	22,3	0,11
Al	1-2	0,4	329,6	2,8	20	0,22
Al	1-3	0,6	494,4	3,43	18,2	0,32
Al	1-4	1,2	988,8	4,85	14	0,58
Al	1-5	1,8	1483,3	5,94	11	0,82
Cu	2-1	0,2	164,8	1,98	22	0,13
Cu	2-2	0,5	412	3,13	20	0,22
Cu	2-3	0,7	576,8	3,71	18,6	0,3
Cu	2-4	1,4	1153,7	5,24	15,5	0,48
Cu	2-5	1,8	1483,3	5,94	14	0,58

Kod ispitivanja hidrauličnom prešom mjeri se maksimalna sila sabijanja, vrijeme sabijanja, dok su konačne dimenzije visine valjčića nakon sabijanja namještene tako da budu jednake kao i

nakon sabijanja gravitacijskim batom. U tablici 2 prikazani su rezultati ispitivanja hidrauličnom prešom.

**Tablica 2. Rezultati ispitivanja hidrauličnom prešom**

Materijal uzorka	Broj uzorka	Maksimalna sila sabijanja, N	Vrijeme sabijanja, s	Prosječna brzina deformiranja, m/s	Konačna visina uzorka, mm	Logaritamski stupanj deformacije
Al	3-1	58,176 (30,7 bar)	1,1	0,00245	22,3	0,11
Al	3-2	77,604 (40 bar)	2	0,00245	20	0,22
Al	3-3	88,000 (45 bar)	2,8	0,00245	18,2	0,32
Al	3-4	108,825 (55 bar)	4,5	0,00245	14	0,58
Al	3-5	161,306 (80 bar)	5,7	0,00245	11	0,82
Cu	4-1	73,724 (38 bar)	1,2	0,00245	22	0,13
Cu	4-2	108,825 (55 bar)	2	0,00245	20	0,22
Cu	4-3	119,244 (60 bar)	2,6	0,00245	18,6	0,3
Cu	4-4	150,895 (75 bar)	3,8	0,00245	15,5	0,48
Cu	4-5	182,139 (90 bar)	4,5	0,00245	14	0,58

### 5.1. Mjerenja tvrdoće

Mjerenja tvrdoće obavljena su Vickersovom metodom (HV 10). Kod Vickersa kao penetrator je korištena istostrana četverostrana piramida od dijamanta s kutem između stranica od 136°. Ovaj kut nije odabran nasumice već se utiskivanjem penetratora pod tim kutem dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili pa se tvrdoća mekih i tvrdih materijala može mjeriti primjenom iste sile. Uzorci ispitivani na batu žareni su rekristalizacijskim žarenjem jer je deformiranje uzoraka bilo poprilično nepredvidivo zbog neujednačene mikrostrukture. Također neki od ispitivanih uzoraka imali su grubu površinu što može naštetiti rezultatima. Tvrdoća svakog uzorka mjerena je tri puta, na središtu uzorka (1. mjerenje), na obodu uzorka (3. mjerenje) i između središta i oboda uzorka (2. mjerenje).

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati sva tri mjerenja. Pod kraticom „Rep.“ smatra se reprezentativni uzorak koji nije bio sabijen niti s prešom niti s batom.

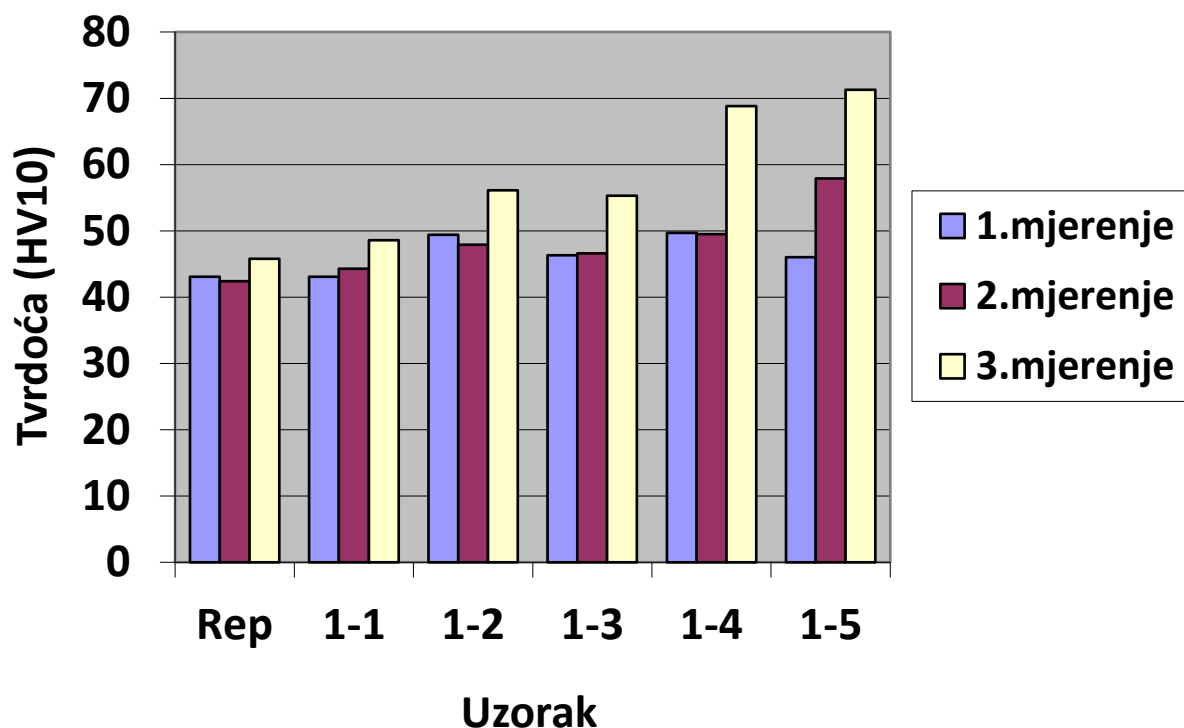


**Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka sabijenih gravitacijskim batom**

Uzorci sabijeni gravitacijskim batom						
Materijal	Uzorak	Konačna visina uzorka	1.mjerenje Tvrdoće – HV 10	2.mjerenje Tvrdoće – HV 10	3.mjerenje Tvrdoće – HV 10	Aritmetička sredina mjerenja Tvrdoće – HV10
Al	Rep.	53,5	43,1	42,4	45,8	43,8
Al	1-1	22,3	43,1	44,3	48,6	45,3
Al	1-2	20	49,4	47,9	56,1	51,1
Al	1-3	18,2	46,3	46,6	55,3	49,4
Al	1-4	14	49,7	49,5	68,8	56
Al	1-5	11	46	57,9	71,3	58,4
Cu	Rep.	54,5	45,1	44	44,4	44,5
Cu	2-1	22	53,1	67,3	92	70,8
Cu	2-2	20	88	86,5	92	88,8
Cu	2-3	18,6	60,2	77,9	89,6	75,9
Cu	2-4	15,5	76	93,2	122,6	97,3
Cu	2-5	14	80,5	92,4	106,6	93,2

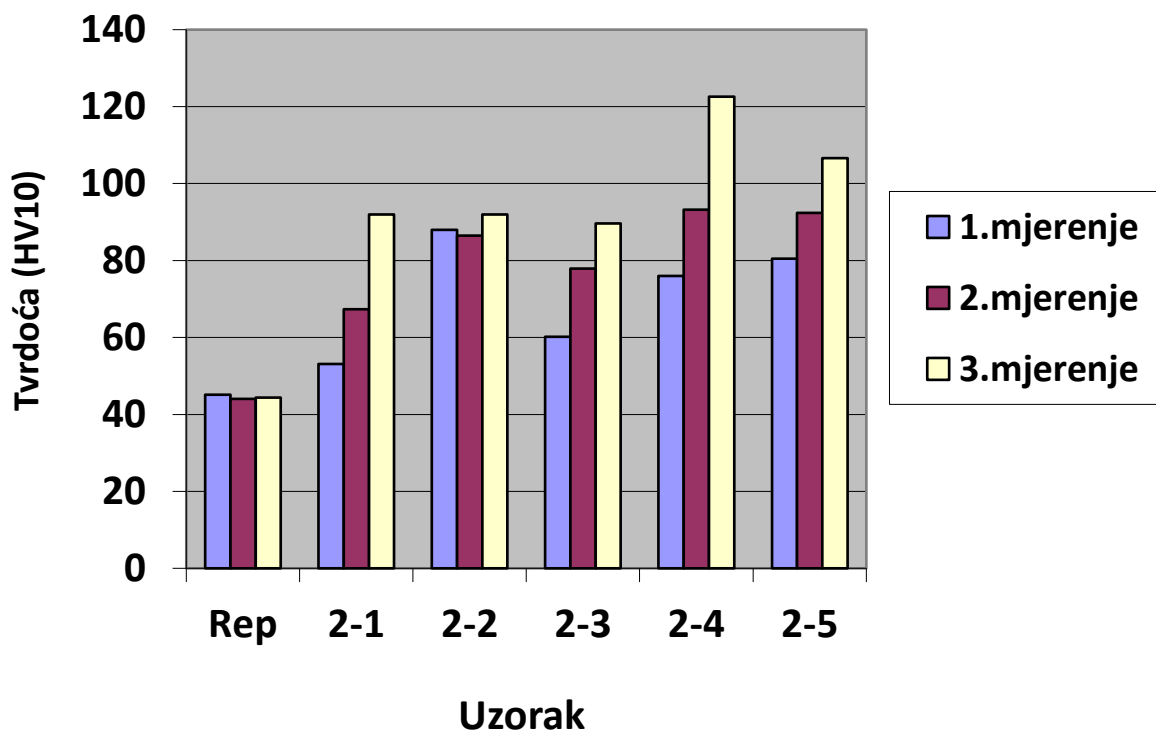
**Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće uzoraka sabijenih hidrauličnom prešom**

Uzorci sabijeni prešom						
Materijal	Uzorak	Konačna visina uzorka	1.mjerenje Tvrdoće – HV 10	2.mjerenje Tvrdoće – HV 10	3.mjerenje Tvrdoće – HV 10	Aritmetička sredina mjerenja Tvrdoće – HV 10
Al	Rep.	41	110,3	108,2	108,7	109,1
Al	3-1	22,3	43	43,4	47,9	44,8
Al	3-2	20	43,2	44,3	52	46,5
Al	3-3	18,2	44,4	44,7	54,4	47,8
Al	3-4	14	43,2	45,7	63,1	50,7
Al	3-5	11	43,9	51,9	65	53,6
Cu	Rep.	57	97,6	107,7	100,3	101,9
Cu	4-1	22	44,2	59,8	77,2	60,4
Cu	4-2	20	49,8	66	81,2	65,7
Cu	4-3	18,6	55,9	76,9	110,3	81
Cu	4-4	15,5	59,3	80,5	106,6	82,1
Cu	4-5	14	54,4	69,4	99,8	74,5



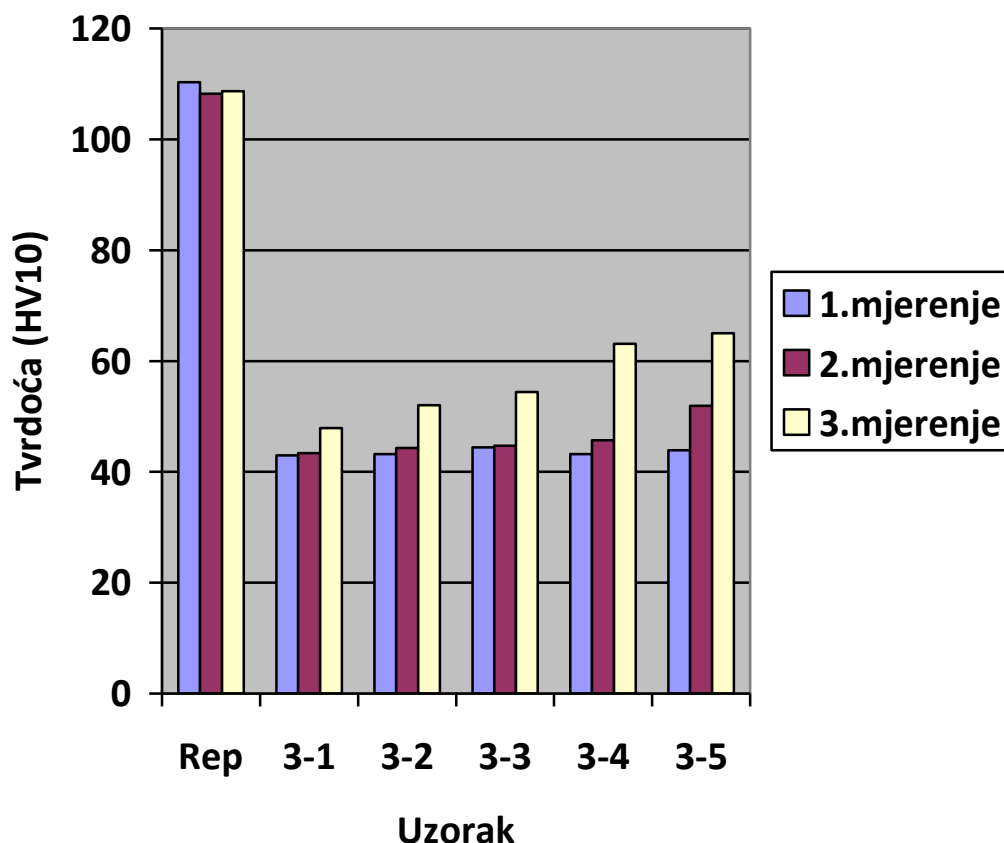
**Slika 25. Grafički prikaz tvrdoća aluminijskih uzoraka sabijenih gravitacijskim batom**

Na slici 25 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće aluminijskih uzoraka sabijenih na gravitacijskom batu. Vidljivo je da se tvrdoća povećava kako se i povećavala visina podizanja malja, odnosno kako se povećavao stupanj deformacije. Razlog tome je što je veći stupanj deformacije manja je pokretljivost dislokacija pa se smanjuje duktilnost odnosno povećava tvrdoća. Također vidljivo je da je u svim uzorcima tvrdoća na rubu uzorka veća od tvrdoće na sredini uzorka. To se može pripisati pojavi trenja između alata i uzorka.



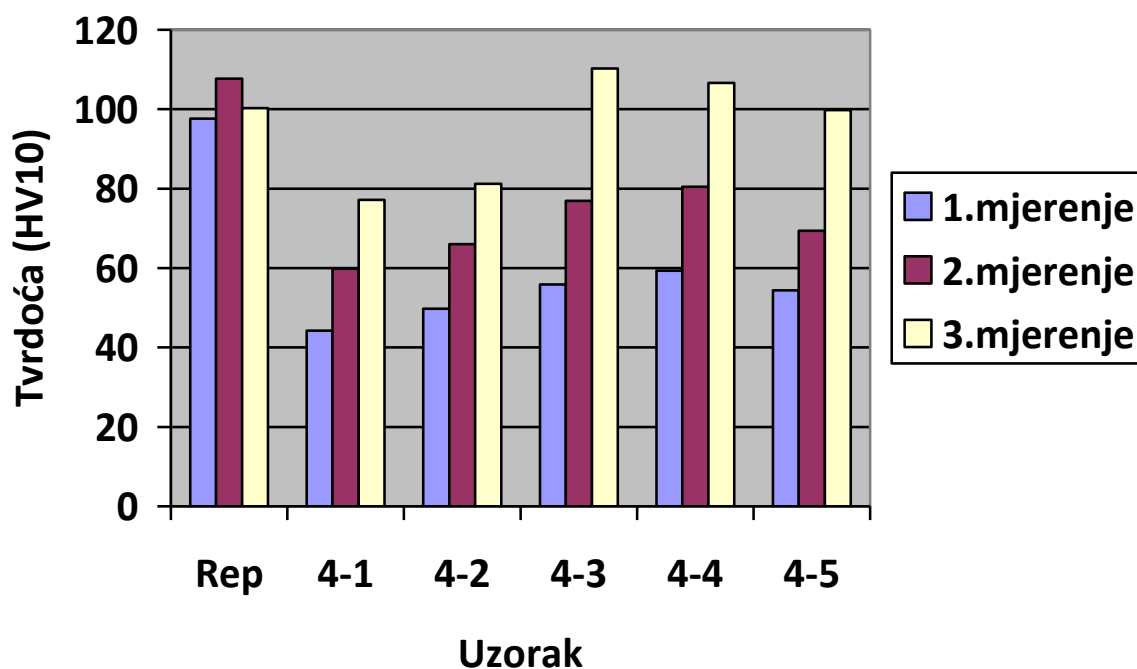
**Slika 26. Grafički prikaz tvrdoća bakrenih uzoraka sabijenih gravitacijskim batom**

Na slici 26 grafički su prikazane tvrdoće bakrenih uzoraka sabijenih na gravitacijskom batu. Također kao i kod aluminijskih uzoraka sabijenih na batu tvrdoća se povećavala kako se povećavala i visina podizanja malja, odnosno povećavao stupanj deformacije. Veća su rasipanja rezultata u odnosu na aluminijske uzorke i općenito su veće vrijednosti tvrdoće. Slično kao i kod aluminijskih, zbog djelovanja trenja, tvrdoća na rubu uzorka veća je nego ona na sredini. Razlog tome je veći stupanj deformacije ruba jer čestice prevaljuju veći put nego one koje se nalaze u osi simetrije. Ističe se uzorak 2-5 koji ima manju tvrdoću od uzorka 2-4 iako ima manji stupanj deformacije. To možemo pripisati nedovoljno fino obrađenoj površini uzorka na kojem smo mjerili tvrdoću te se pojavila pogreška mjerenja.



**Slika 27. Grafički prikaz tvrdoća aluminijskih uzoraka sabijenih hidrauličnom prešom**

Na slici 27 grafički su prikazane tvrdoće aluminijskih uzoraka sabijenih na hidrauličnoj preši. Sabijeni uzorci imaju relativno mala rasipanja i zadovoljavaju neka pravila oblikovanja deformiranjem. Ta pravila su da tvrdoća uzoraka raste sa stupnjem deformacije i to da je tvrdoća manja na sredini uzorka u usporedbi s tvrdoćom na rubu uzorka što pripisujemo većem stupnju deformacije ruba jer čestice prevaljuju manji put kada su u osi simetrije. Tvrdoća reprezentativnog uzorka znatno je veća nego tvrdoća sabijenih uzoraka. Vjerojatna je pogreška mjerenja budući da površine reprezentativnih uzoraka nisu bile polirane, nego samo brušene. Ako usporedimo rezultate s aluminijskim uzorcima sabijenim na gravitacijskom batu vidljivo je da su uzorci sabijeni na preši imaju manju prosječnu vrijednost tvrdoće nego uzorci sabijenu na batu.



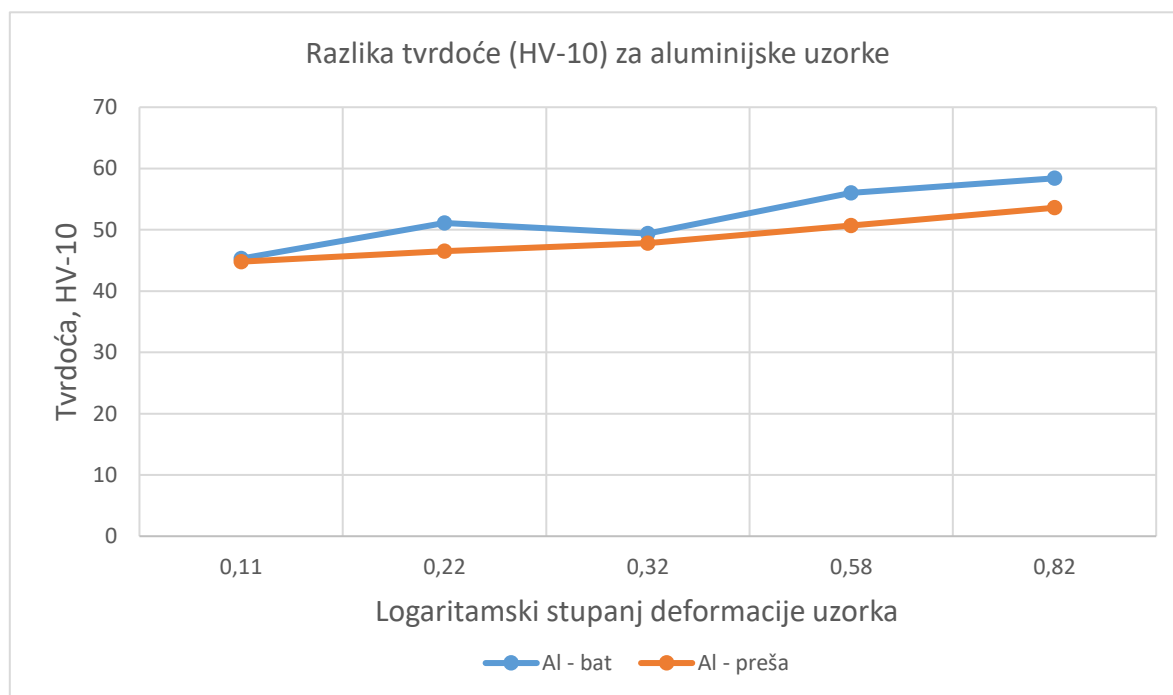
**Slika 28. Grafički prikaz tvrdoća bakrenih uzoraka sabijenih hidrauličnom prešom**

Na slici 28 grafički su prikazane tvrdoće bakrenih uzoraka sabijenih na hidrauličnoj preši. Odmah je vidljivo da i ovdje imamo veću tvrdoću uzorka na rubu nego na sredini. Također se pojavljuje rasipanje vrijednosti tvrdoće i uzorak 4-5 nema najveću tvrdoću iako bi trebao imati jer ima najveću vrijednost logaritamskog stupnja deformacije. No, svakako je prisutan porast tvrdoće povezan uz porast stupnja deformacije uzorka. Pa tako uzorak 4-5 ima značajno veću tvrdoću od uzorka 4-1. I u ovom slučaju je prisutna pogreška mjerenja na reprezentativnom uzorku, uzrokovana istim problemom. Ako usporedimo rezultate s uzorcima sabijenima na gravitacijskom batu vidljivo je da je prosječna tvrdoća uzoraka veća kod uzoraka sabijenima na batu u usporedbi s uzorcima sabijenima na preši. Isti slučaj je i kod aluminija.

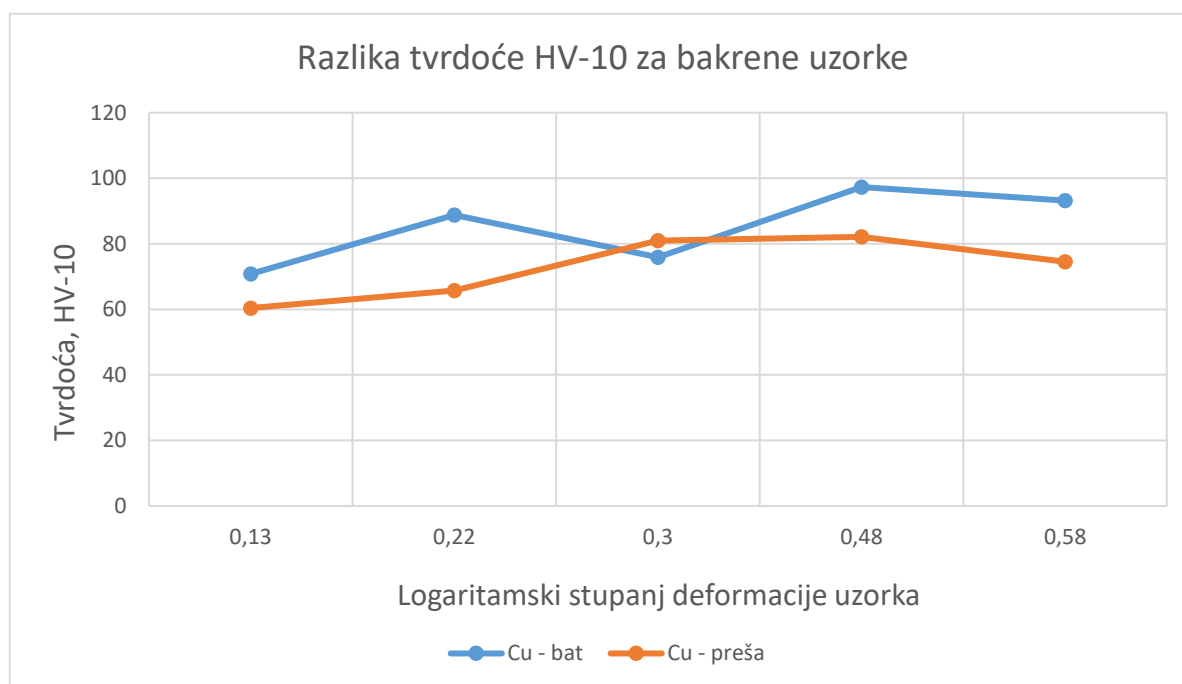
## 5.2. Usporedba tvrdoća postignutih različitim brzinama deformacije

Kao što je očekivano i prethodno komentirano, pojavljuje se razlika postignute tvrdoće istog materijala uz isti stupanj deformacije s obzirom na različite parametre samog procesa deformiranja, u ovom slučaju – s obzirom na različite brzine deformacije. Iako, prema dostupnoj literaturi, ovakve razlike su puno značajnije u slučaju oblikovanja metalnog materijala u toplom stanju, i u prikazanom slučaju oblikovanja u hladnom stanju možemo ih detektirati.

Slika 29 prikazuje razlike tvrdoće aluminijskog valjčića sabijanog na gravitacijskom batu u odnosu na valjčić sabijan na hidrauličnoj preši, a slika 30 prikazuje istu razliku za sabijane valjčiće od legure bakra.



**Slika 29. Razlika izmjerene tvrdoće HV 10 na sabijanim aluminijским uzorcima s obzirom na brzinu deformacije, odnosno stroj na kojem se deformacija odvijala**



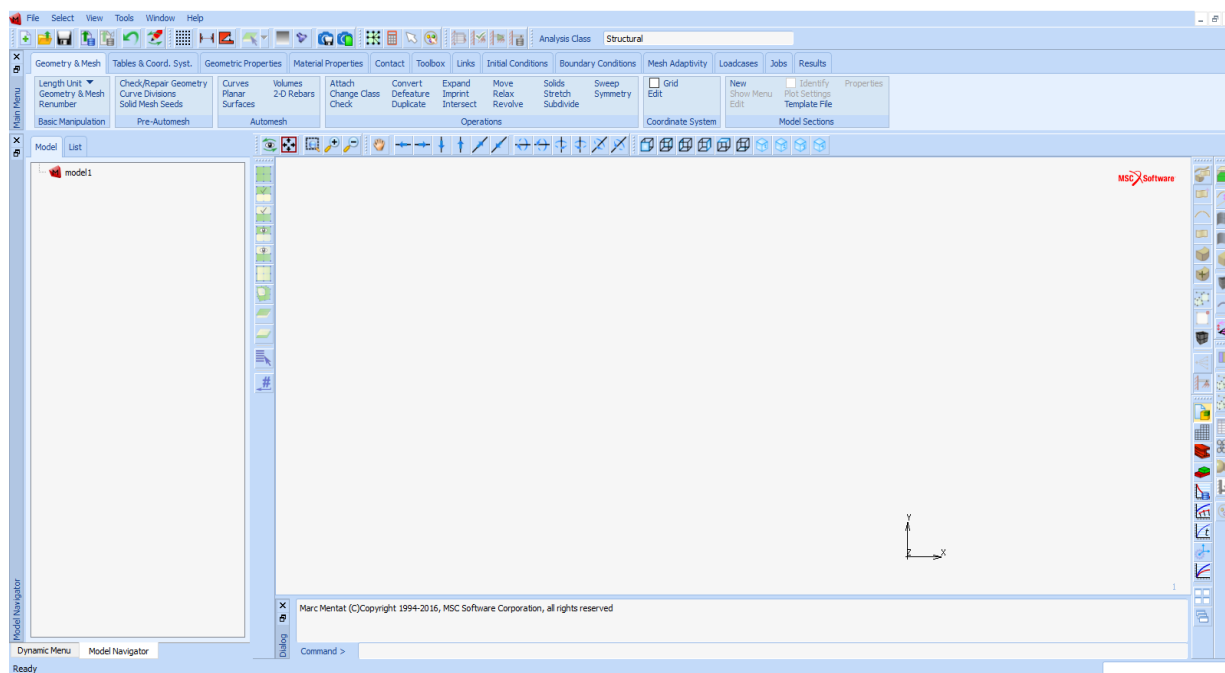
**Slika 30. Razlika izmjerene tvrdoće HV 10 na sabijanim uzorcima bakrene legure s obzirom na brzinu deformacije, odnosno stroj na kojem se deformacija odvijala.**

## 6. RAČUNALNA SIMULACIJA

Nakon eksperimentalnog dijela provedenog u laboratoriju za oblikovanje deformiranjem, provodi se računalna simulacija sabijanja kako bi usporedili stvarne rezultate sa simuliranim. Računalna simulacija obavljena je u programu MSC Marc Mentat 2016.

### 6.1. Pokretanje programa

Na slici 31 prikazano je početno sučelje programa nakon pokretanja te svi daljnji koraci počinju odavde odabirom neke od opcija na vrhu.

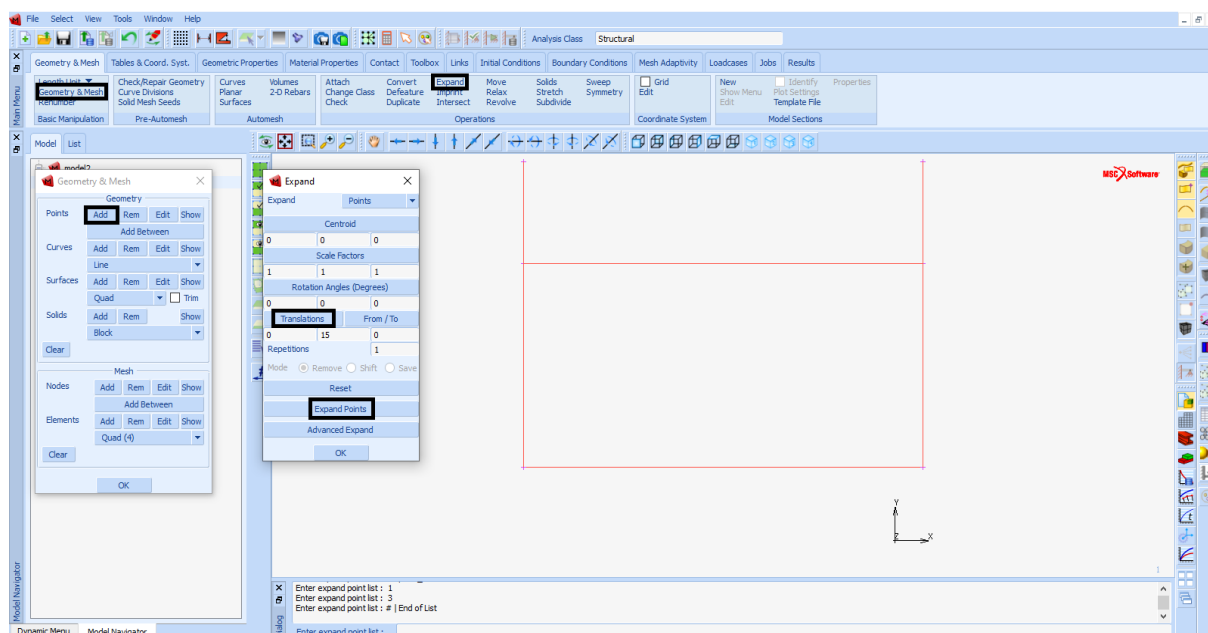


Slika 31. Početno sučelje programa

### 6.2. Konstrukcija valjčića

Prvi korak je konstruiranje valjčića kojeg ispituujemo. Odabirom funkcije „*Geometry&Mesh*“ otvara se novi izbornik i kod funkcije „*Points*“ pritisnemo „*Add*“ te se unose koordinate prve točke (x,y,z). Dalje se odabire funkcija „*Expand*“, a zatim odabirom funkcije „*Translations*“ unose se koordinate nove točke. Pritiskom na „*Expand Points*“ te na „*All existing*“ dobiva se pravac udaljen za nove unesene koordinate. Na isti način može se translirati pravac i dobiti željeni oblik valjčića prikazan na slici 32 samo što pod opcijom „*Expand*“ ne stavlja se „*Points*“ nego „*Curves*“ kako bi se dobio oblik valjčića umjesto transliranja dvije točke. Na slici 32 također su prikazane dvije dodatne linije koje prikazuju malj i nakovanj i konstruirane su na isti način, transliranjem točaka na nove koordinate.

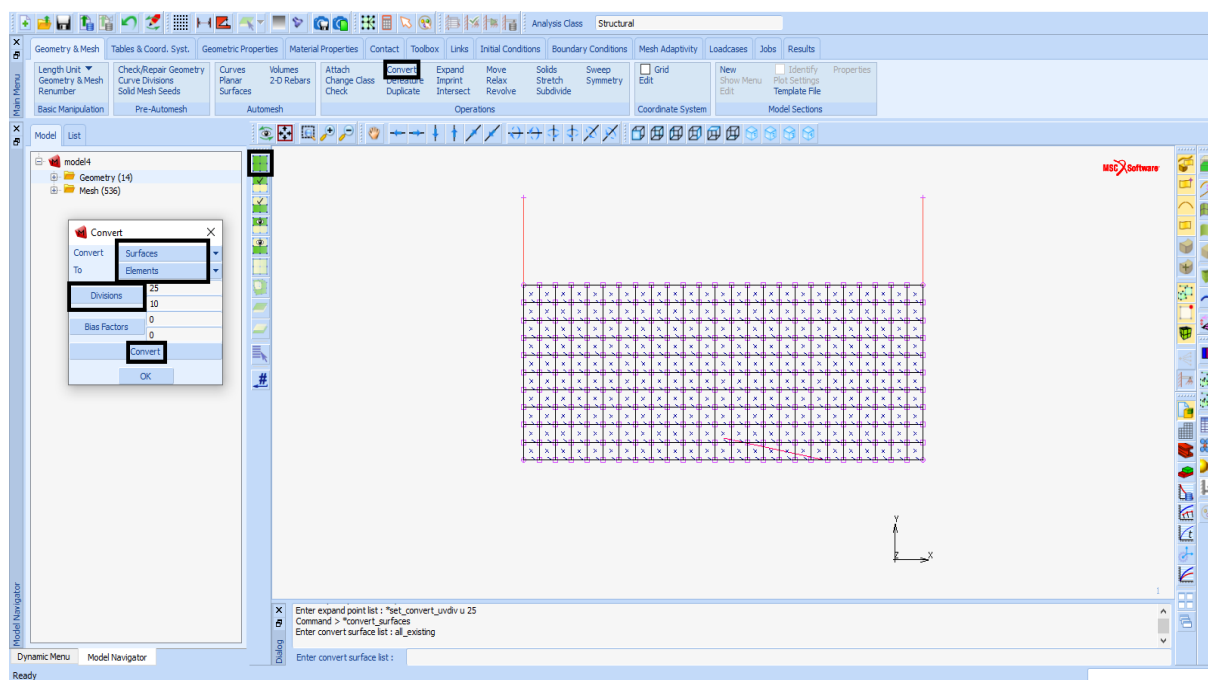




Slika 32. Konstrukcija i izgled valjčiča

### 6.3. Mreža konačnih elemenata

Nakon konstrukcije valjčiča dodjeljuje se mreža konačnih elemenata. Što je više elemenata u mreži rezultati su precizniji. Za ovaj slučaj tlačenja koristi se mreža 25 x 10. Mrežu se postavlja tako da se odabire opcija „Convert“ te pod „Divisions“ upisuje se veličina mreže koju želimo. Također se mora paziti da je odabrana opcija „Surfaces to elements“. Nadalje pritiskom na „convert“ odabire se površina kojoj se želi dodijeliti mreža tako da se pritisne „All existing“. Dobivena mreža prikazana je na slici 33.



Slika 33. Mreža konačnih elemenata

#### 6.4. Unos svojstava aluminija i bakra

U ovom radu korišteni su valjčići od aluminija i bakra. Kako su valjčići sabijani na različitim kovačkim strojevima tako su sabijani različitim brzinama. Krivulje tečenja bit će prikazane za manju i veću brzinu deformacije, na sobnoj temperaturi. Krivulje tečenja za aluminij (Al 99.5) dane su u prilogu [I], iz kojeg su očitane vrijednosti i prikazane su u tablicama 5 i 6.

**Tablica 5. Krivulja tečenja aluminija (manja brzina)**

Aluminij	
$\varphi$	$k_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	70
0.2	90
0.4	110
0.6	120
0.8	125
1	130

**Tablica 6. Krivulja tečenja aluminija (veća brzina)**

Aluminij	
$\varphi$	$k_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	110
0.2	120
0.4	135
0.6	155
0.8	160
1	170

Gdje je:

$\varphi$  - Logaritamski stupanj deformacije

$k_f$ - Naprežanje plastičnog tečenja

Nadalje, na sličan način za različite brzine deformacije dane su krivulje tečenja za bakrenu leguru (CuAl5) te su prikazane u tablicama 11 i 12 i očitane su iz priloga [II]. Krivulje tečenja očitane su za sobnu temperaturu i to aproksimativno, služeći krivuljama tečenja za veće temperature.

**Tablica 7. Krivulja tečenja za bakar (mala brzina)**

Bakar	
$\varphi$	$k_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	220
0.2	230
0.4	240
0.6	260
0.8	240
1	230

Tablica 8. Krivulja tečenja za bakar (velika brzina)

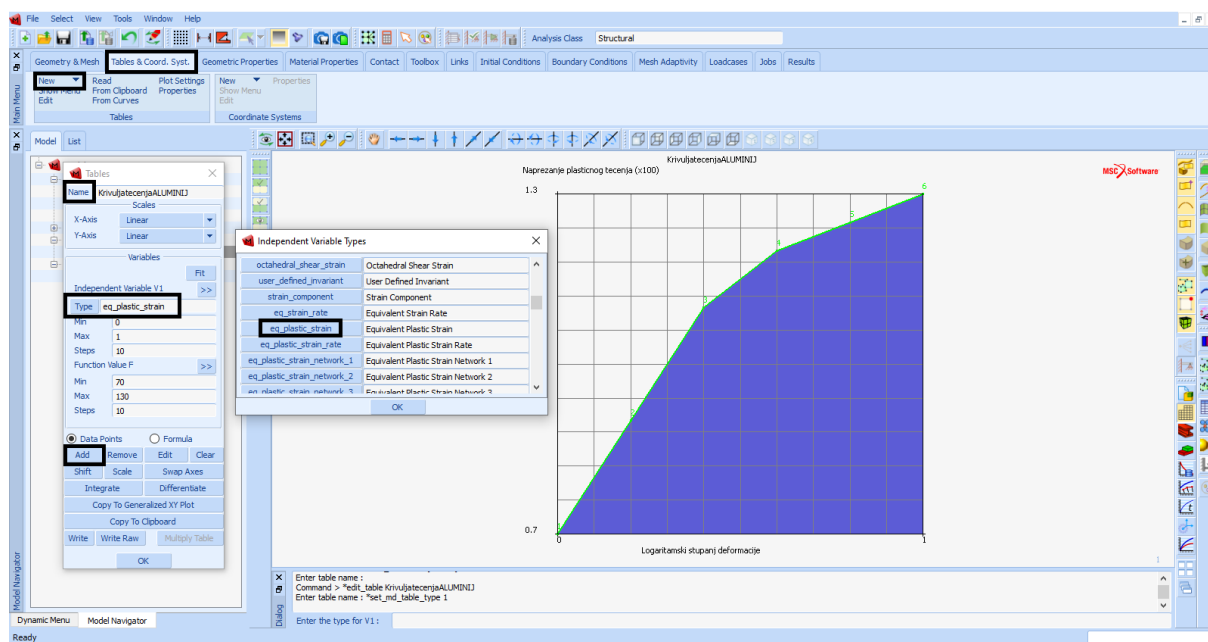
Bakar	
$\varphi$	$k_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0	310
0.2	330
0.4	340
0.6	360
0.8	340
1	330

Gdje je:

$\varphi$  - Logaritamski stupanj deformacije

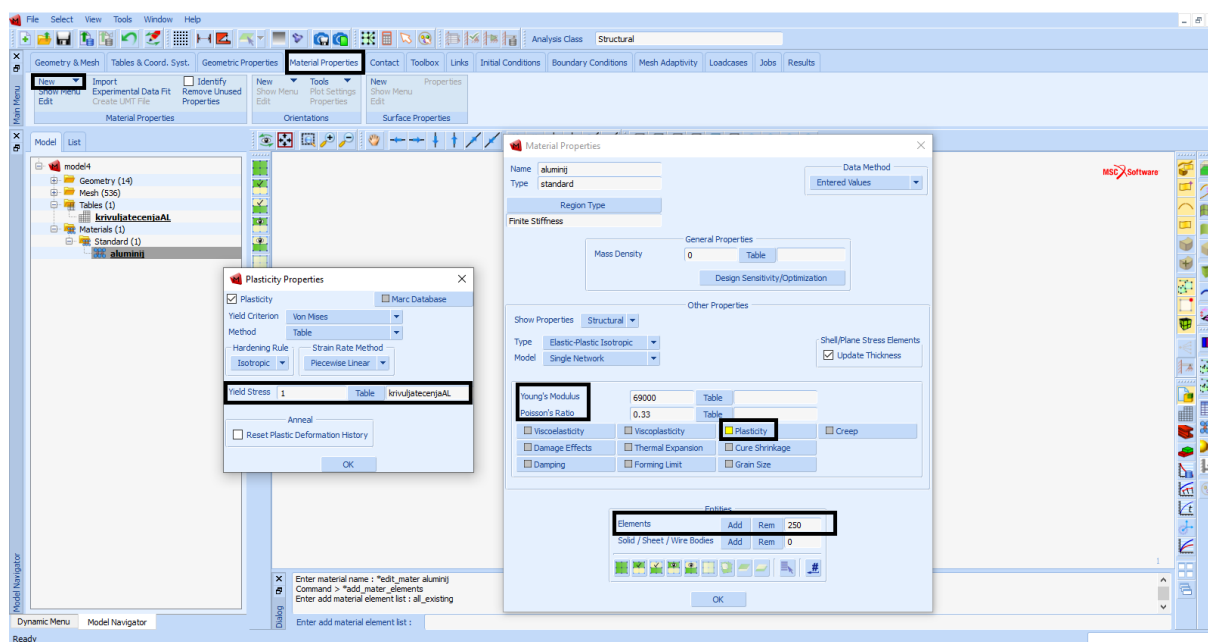
$k_f$ - Naprezanje plastičnog tečenja

U programu ove tablice se rade na sljedeći način. Na glavnom izborniku odabire se „Tables&Coordinate System“ te zatim „New“ i nakon toga „1 Independent Variable“. Nakon toga otvara se novi izbornik. U novom izborniku upisuje se naziv tablice pod „name“ (npr. Krivulja tečenja). Nakon toga pritiskom na „Add“ dodaju se točke iz gore navedenih tablica. Također pod „Type“ odabire se „eq\_plastic\_strain“, te se numeriraju osi tako da odgovaraju unesenim vrijednostima.



**Slika 34. Krivulja tečenja aluminija (manja brzina)**

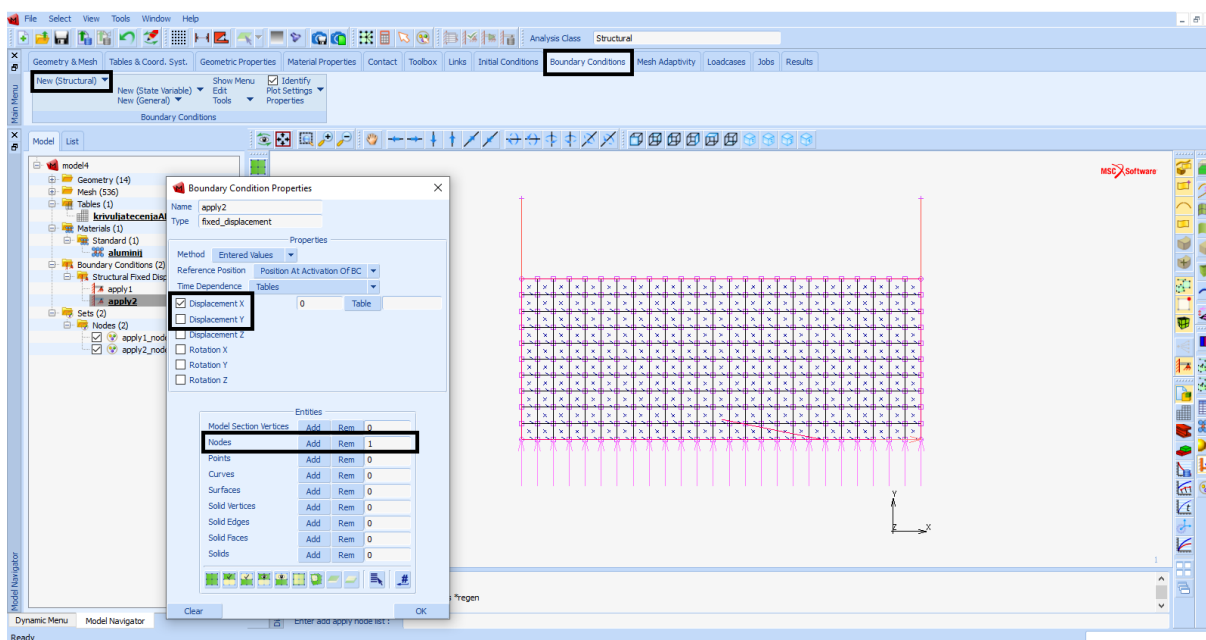
Nakon što se napravila tablica tečenja mora se pridružiti određenom materijalu. Pod izbornikom „Material Properties“ odabire se „New – Finite Stiffness Region – Standard“. Nakon toga unose se točne vrijednosti za Youngov modul elastičnosti i Poissonov faktor ovisno koji je materijal sirovca. Nakon toga pod funkcijom „Plasticity“ pod prozor „Yield Stress“ se unosi vrijednost 1, a pod „table“ se pridružuje jedna od prethodno napravljenih tablica tečenja. Ono na što se također mora paziti je da se tablica pridruži onim elementima koji su napravljeni od tog materijala. To se radi tako da pod „Elements“ pritiskom na „Add“ odabire se „All existing“. Cijeli ovaj postupak za aluminij prikazan je na slici 35.



Slika 35. Odabrana svojstva za aluminij

## 6.5. Određivanje rubnih uvjeta

Za postavljanje rubnih uvjeta pod funkcijom „Boundary Conditions“ odabire se „New (structural)“ te „Fixed Displacement“. Nakon toga se otvara novi izbornik gdje se odabire „Displacement Y“ te se odabiru točke kojima se želi ograničiti kretanje po y smjeru. Točke se odabiru tako da se kod izbornika „Nodes“ pritisne na „Add“ i označe točke na donjoj liniji. Drugim uvjetom ograničava se kretanje središnje točke valjčića i to je donja desna točka na modelu, tako da joj se fiksira kretanje po x smjeru. To se radi na isti način kao i za y smjer samo ovaj puta odabire se „Displacement X“. Ako su svi koraci ispravno provedeni dobivamo radni komad prikazan na slici 36.

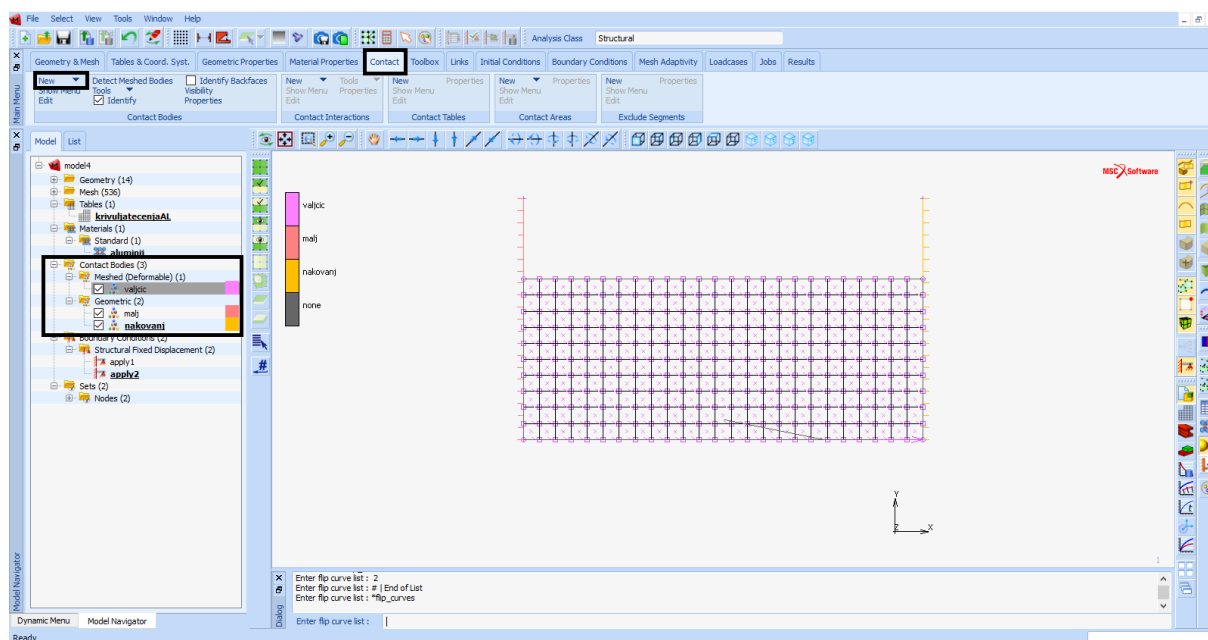


Slika 36. Zadani rubni uvjeti

## 6.6. Definiranje tijela

U ovom koraku na konstrukciji određuju se malj, nakovanj i sirovac (valjčić). Malj i sirovac označeni su kao kruta tijela, a valjčić kao deformabilno tijelo. Kasnije se malju pridružuje tablica brzine gibanja, čiji način izrade će biti opisan u sljedećem poglavlju.

Pritiskom na izbornik „Contact“ odabire se „New“ i „Meshed (Deformable)“. Nakon toga pod „Name“ upisuje se ime (npr. Malj ili Sirovac) te pod „Obsolete Properties“ otvara se izbornik u kojem se pod „Friction Coefficient“ upisuje koeficijent trenja, u našem slučaju 0.3. Nakon toga pod „Elements“ dodaju se svi elementi pritiskom na „All existing“. Nakon toga isto se ponavlja za malj i nakovanj samo umjesto opcije „Meshed (Deformable)“ odabire se „Geometric“, unosi se ime i faktor trenja te kasnije pod „Curves“ dodaju se željene krivulje, odnosno krivulje nam prikazuju malj i nakovanj. Na kraju potrebno je promijeniti orijentaciju nakovnja jer ne može imati istu orijentaciju kao i malj. To se radi tako da pod se izbornikom „Contact“ odabire „Tools“ te „Flip Curves“. Nakon toga odabire se željena krivulju kojoj se želi promijeniti smjer. Ako su svi koraci ispravno provedeni dobiva se radni komad prikazan na slici 37.



Slika 37. Definirani malj, nakovanj i sirovac

### 6.6.1. Tablice brzine gravitacijskog bata i hidraulične preše

Tablice brzine gibanja bata i preše dodaju se slično kao i tablice logaritamskog stupnja deformacije i naprezanja plastičnog tečenja. Pod izbornikom „Tables&Coordinate System“ pritisne se „New“ i „1 Independent Variable“. Pod „Type“ se odabire „Time“. Nakon toga pritiskom na „Add“ dodaju se točke koje su prikazane u tablicama 9 i 10.

Tablica 9. Tablica vrijeme/brzina za hidrauličnu prešu

$t$ [s]	$v$ [mm/s]
0	10/3
3	10/3
3	-5*10/3
4	-5*10/3



Tablica 10. Tablica vrijeme/brzina za gravitacijski bat

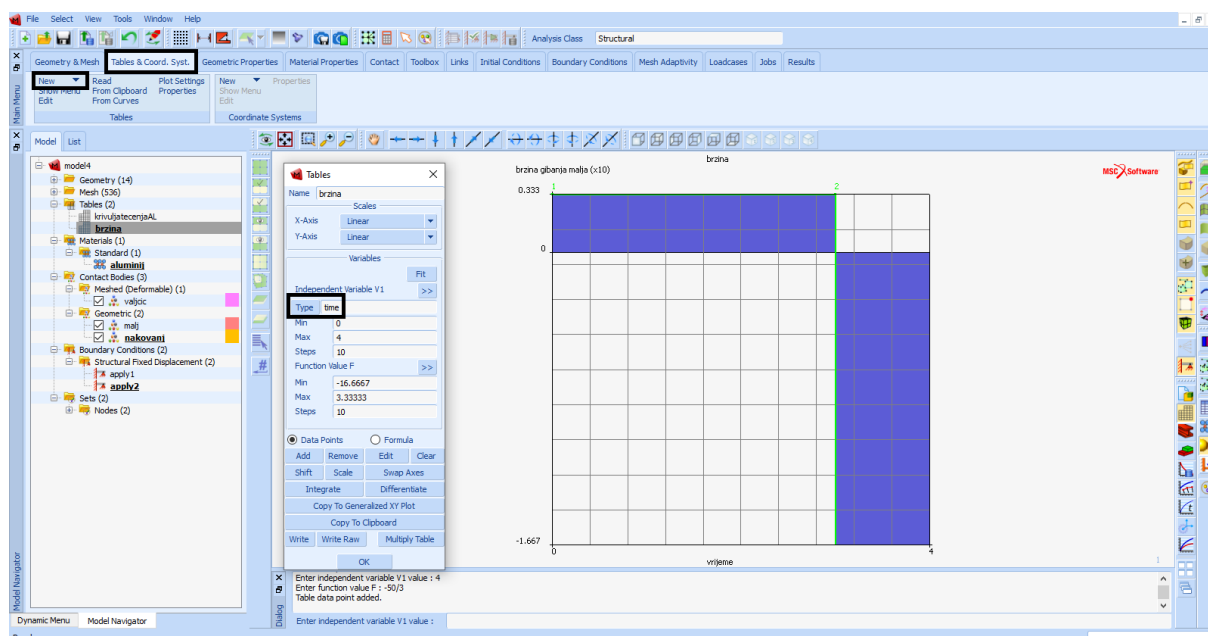
$t$ [s]	$v$ [mm/s]
0	10/0.3
0.2	10/0.3
0.3	-5*10/0.3
0.4	-5*10/0.3

Gdje je:

$t$  – vrijeme

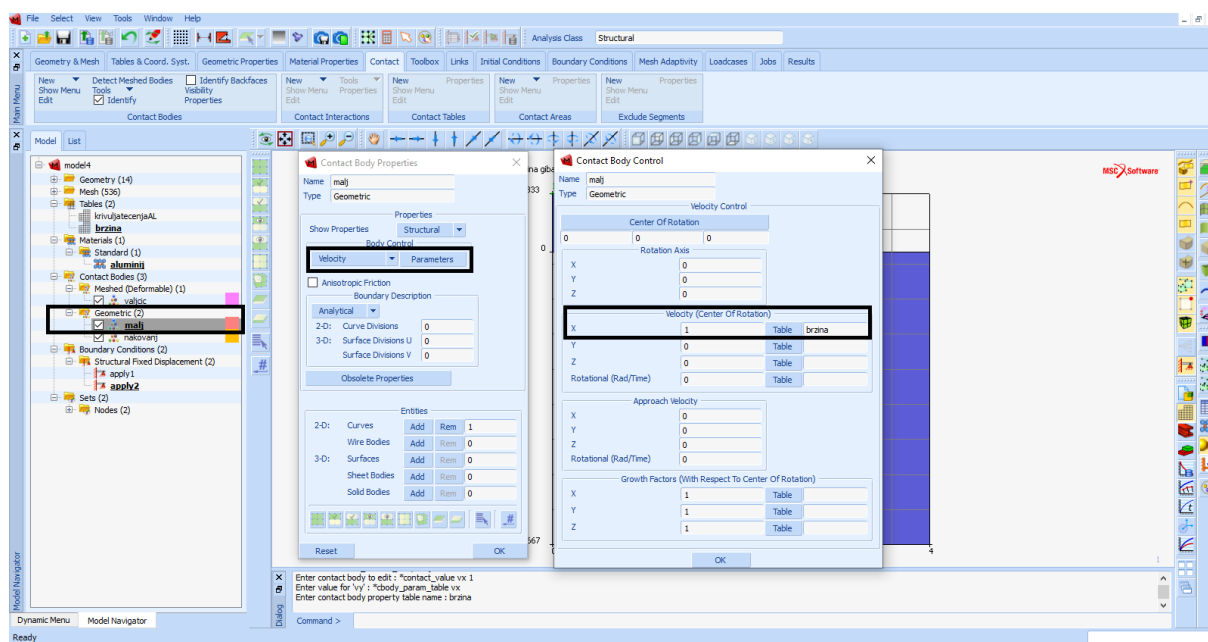
$v$  – brzina gibanja malja

Tablica brzine gibanja za hidrauličnu prešu u računalnom programu prikazana je na slici 38.



Slika 38. Brzina gibanja hidraulične preše

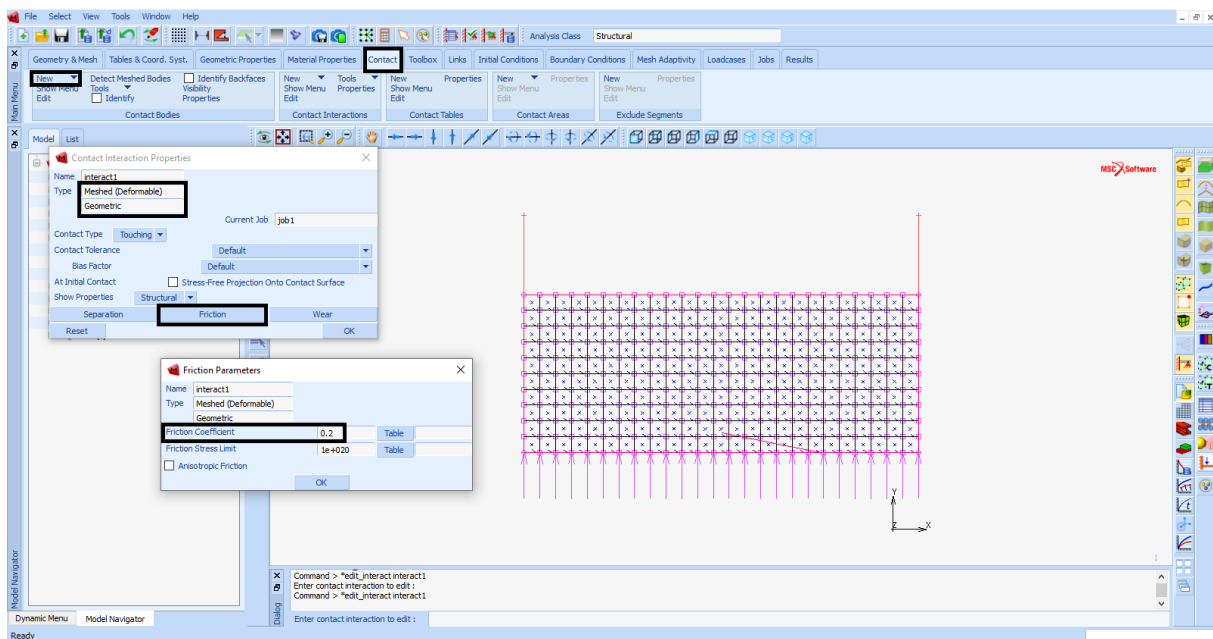
Nakon izrade tablica brzine se mora dodijeliti malju jer je malj taj koji se giba. U izborniku „Malj“ pritiskom na „Parameters“ otvaraju se parametri za unos podataka. Na izborniku „Velocity (center of rotation)“ za os x stavlja se parametar jedan i pridružuje se jednu od prethodno napravljenih tablica gibanja odabirom funkcije „table“ i odabirom željene tablice. Ovaj postupak prikazan je na slici 39.



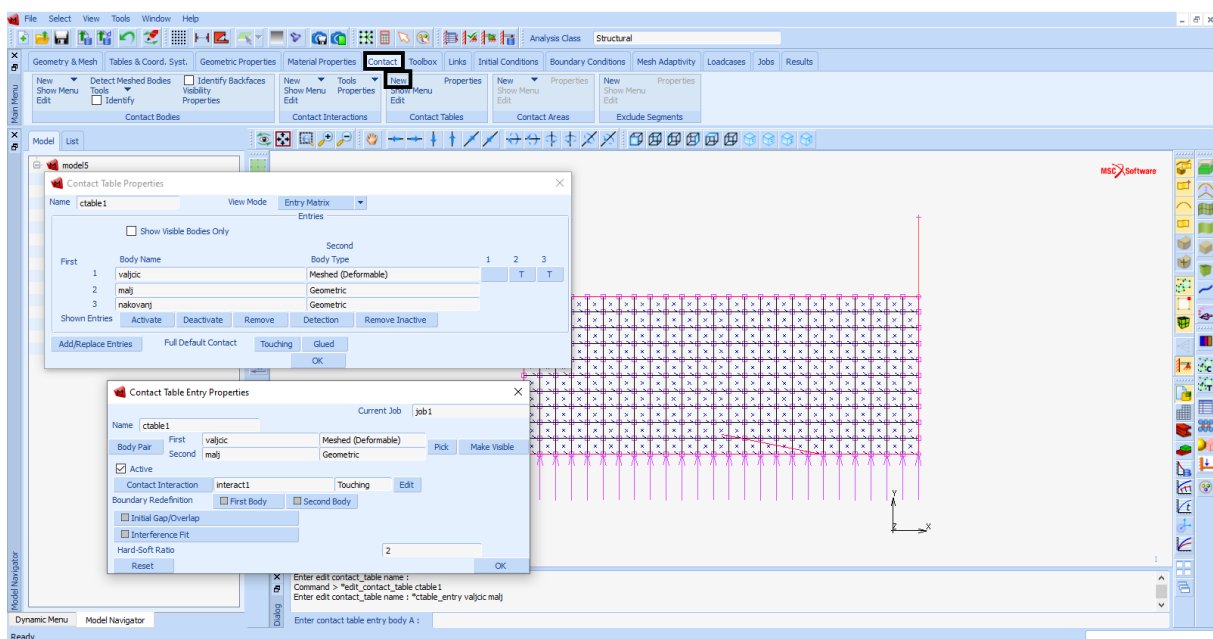
Slika 39. Unos tablice brzine malja

## 6.7. Određivanje kontaktnog međudjelovanja

Određivanje kontaktnog međudjelovanja koristi se kako bi se odredilo koji su dijelovi u dodiru. U izborniku „Contact“ pod „Contact Interaction“ ide se na „New – Meshed (Deformable) vs Geometric“. Ovdje se unosi faktor trenja između dodirnih površina. Nakon toga u istom izborniku pod „Contact tables“ dodaje se kontaktna tablica. U kontaktnoj tablici odabiru se opcije kontaktne tablice i aktivira se koji dijelovi su u dodiru. Ako je sve dobro napravljeno dobiju se opcije prikazane kao na slici 41.



Slika 40. Faktor trenja dodirnih površina

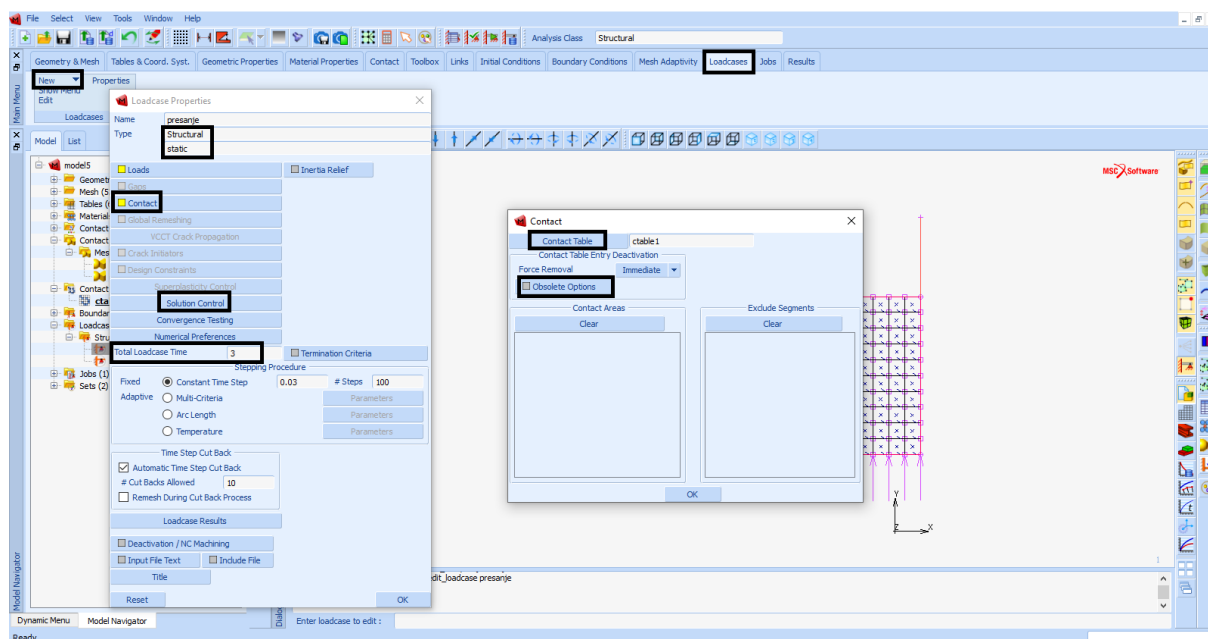


Slika 41. Određivanje kontaktnog međudjelovanja

## 6.8. Definiranje slučaja opterećenja

Prilikom sabijanja dva su slučaja opterećenja, a to su radni (tlačenje) i povratni (otpuštanje). Radni slučaj traje duže i mjeri se u više koraka, dok povratni slučaj traje kraće i ima samo jedan korak, a to je vraćanje malja u početni položaj. Definiranje radnog slučaja prikazano je u

nastavku. U izborniku „Loadcases“ odabire se „New - Static“ i otvara se novi prozor. U tom prozoru pod „Total Loadcase Time“ stavlja se koliko dugo traje radni slučaj što ovisi o tome da li se sabija na hidrauličnoj preši ili gravitacijskom batu, i broj koraka. Nakon toga pod „Solution Control“ stavlja se da je „Max #Recycles“ 20. Također pod izbornikom „Contact“ dodaje se kontaktna tablicu iz prethodnog koraka. Pod „Obsolete Options“, u izborniku „odpuštanje“ dodaje se koje tijelo se otpušta a u našem slučaju to je malj.

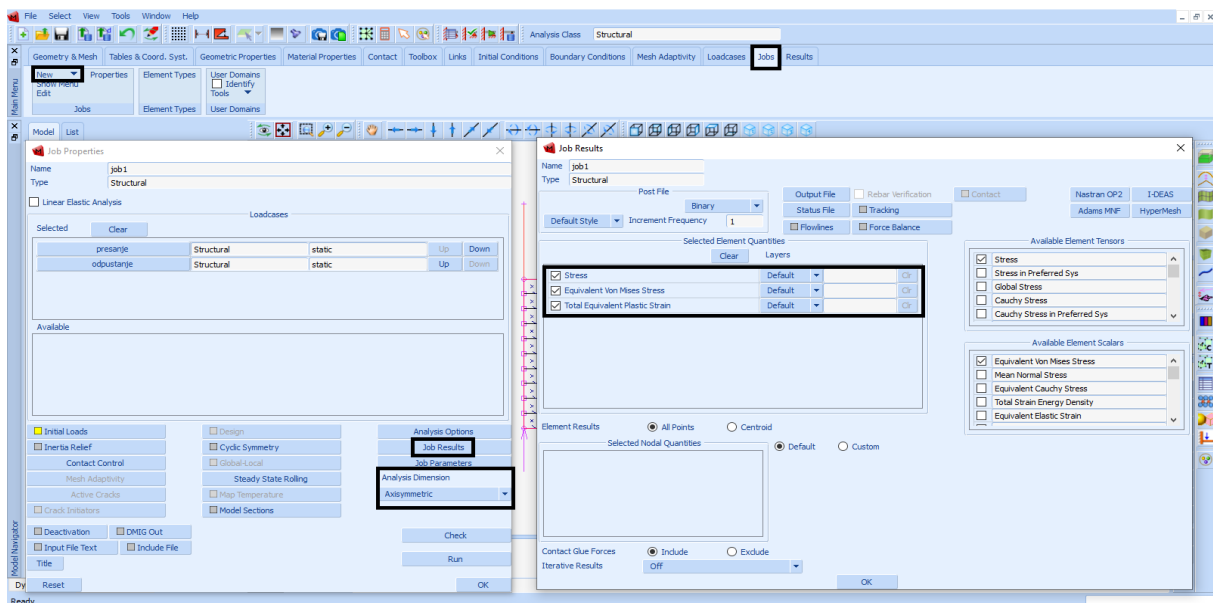


Slika 42. Definiranje slučaja opterećenja

## 6.9. Pokretanje simulacije

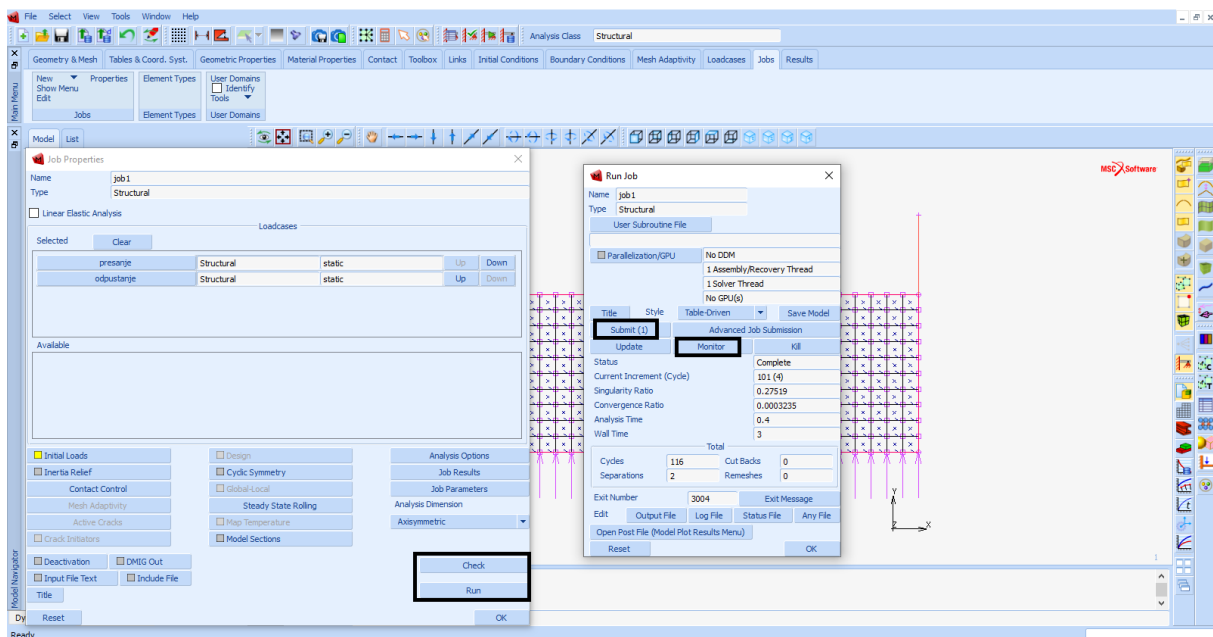
Završni korak je pokretanje simulacije da se proračun obavi u pozadini. U glavnom izborniku pod funkcijom „Jobs“ pritiskom na „New“ odabire se „Structural“. Otvara se novi izbornik u kojem se moraju odabrati oba slučaja opterećenja (radni i povratni). U istom prozoru potrebno je označiti „Initial Loads“ i pod „Analysis Dimension“ odabrati „Axisymmetric“.

Na kraju mora se odabrati što će biti prikazano u tijeku simulacije. Pritiskom na opciju „Job results“ odabire se „Stress“, „Equivalent Von Mises Stress“ i „Total Equivalent Plastic Strain“ što je prikazano na slici 43.

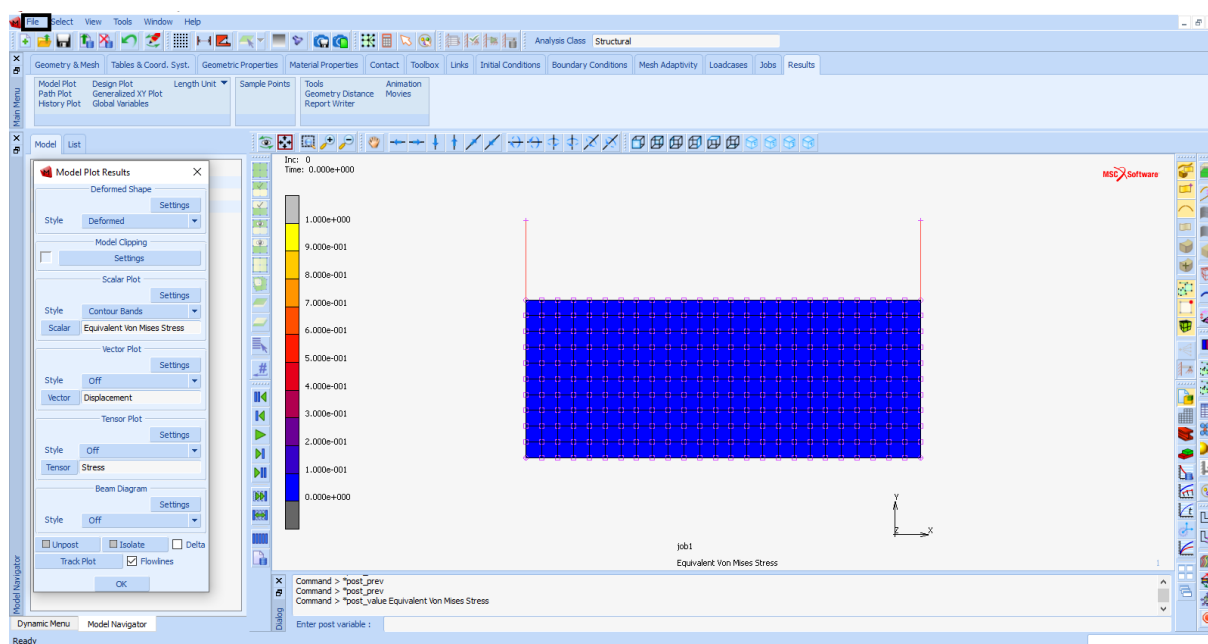


Slika 43. Odabir prikaza nakon simulacije

Za dobivanje rezultata pod funkcijom „jobs“ odabire se „run“, te se pritisne „submit“ i na kraju „monitor“. Prije pokretanja pritiskom na funkciju „Check“ provjerava se ima li naš model kakvih grešaka. Funkcija „monitor“ nakon završene analize prati sve rezultate i na taj način ih sprema u bazu kako bi se simulacija mogla pokrenuti. Na kraju za prikaz analize ide se pod „File – Open Default“ gdje se otvara novi izbornik. U izborniku se stavljaju postavke kao na slici 45 i pokreće se simulacija.



Slika 44. Način pokretanja simulacije

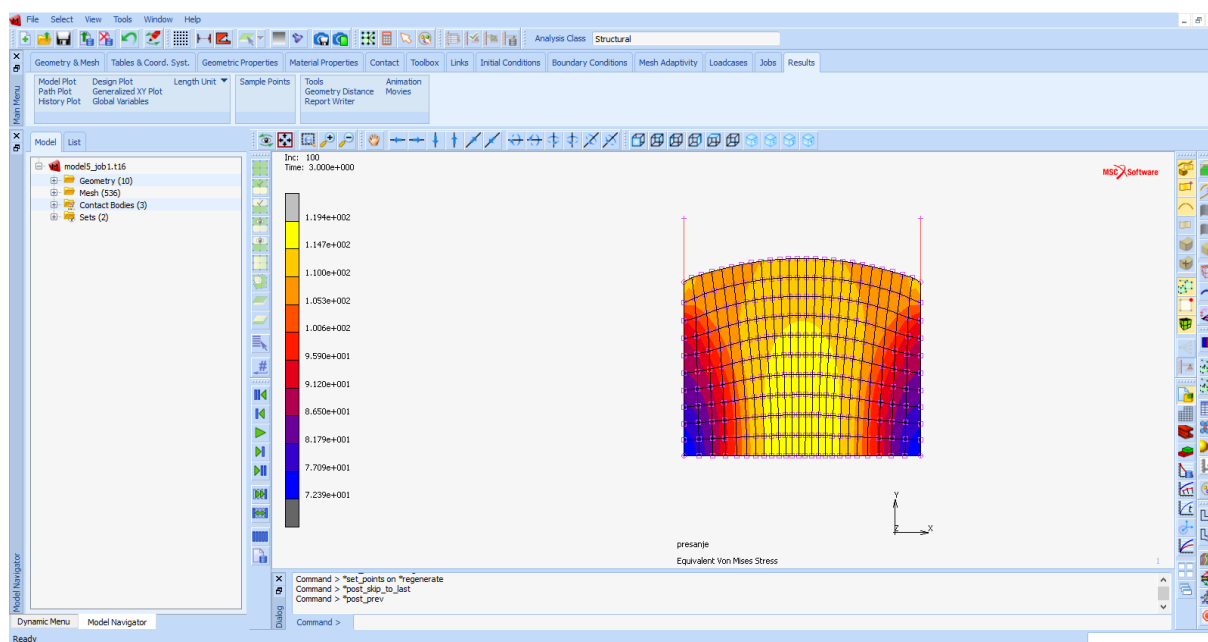


Slika 45. Prikaz prije pokretanja simulacije

## 6.10. Rezultati računalne simulacije

### 6.10.1. Prikaz sabijanja aluminija hidrauličnom prešom

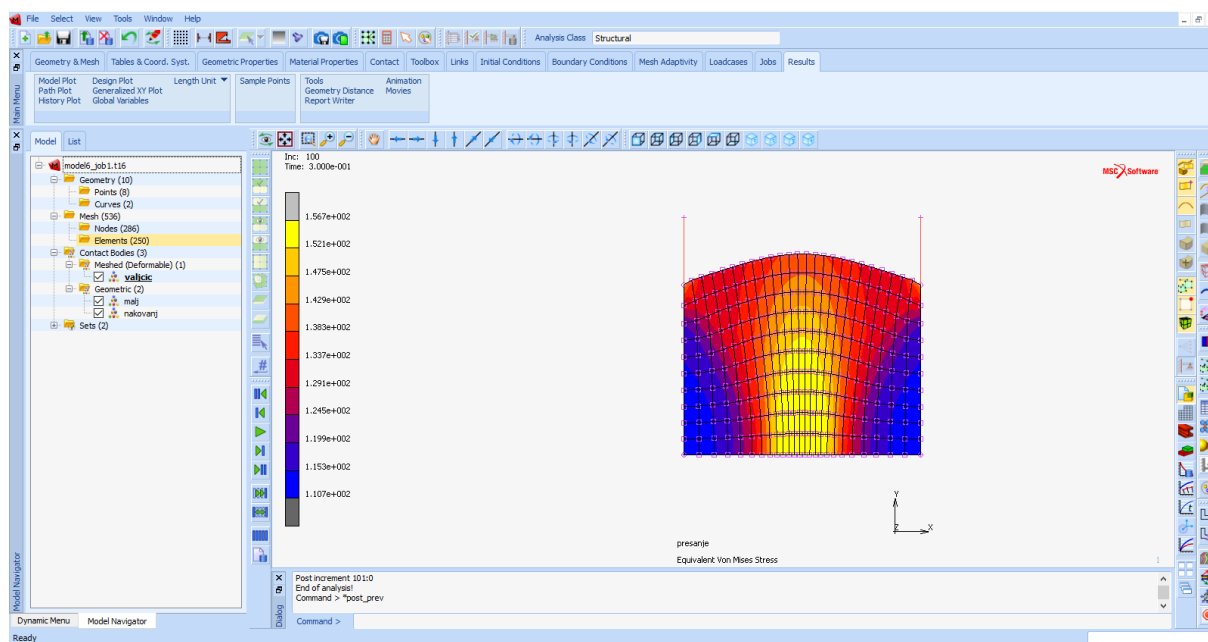
Rezultati računalne simulacije i prikaz raspodjele naprezanja prilikom sabijanja aluminija hidrauličnom prešom prikazani su na slici 46. Na slici je vidljivo da su nam najveća naprezanja u sredini uzorka, tamo gdje je najveće bačvanje i smanjuju se prema rubu, što odgovara zakonima deformacije.



**Slika 46. Simulacija sabijanja aluminija hidrauličnom prešom**

### 6.10.2. Prikaz sabijanja aluminija gravitacijskim batom

Na slici 47 prikazani su rezultati računalne simulacije i prikaz raspodjele naprezanja prilikom sabijanja aluminija gravitacijskim batom. Za razliku od sabijanja aluminija hidrauličnom prešom drugačiji je raspored naprezanja. Kod sabijanja hidrauličnom prešom veći je iznos naprezanja na sredini uzorka a manji na dodirnim površinama. Kod sabijanja na gravitacijskom batu također je manji iznos naprezanja na dodirnim površinama, međutim najveće naprezanje prilikom sabijanja aluminija je na batu. Ako usporedimo raspodjelu naprezanja aluminija i bakrene legure na gravitacijskom batu, vidljivo je da je raspodjela naprezanja vrlo slična, no kod bakrene legure iznos naprezanja je veći.

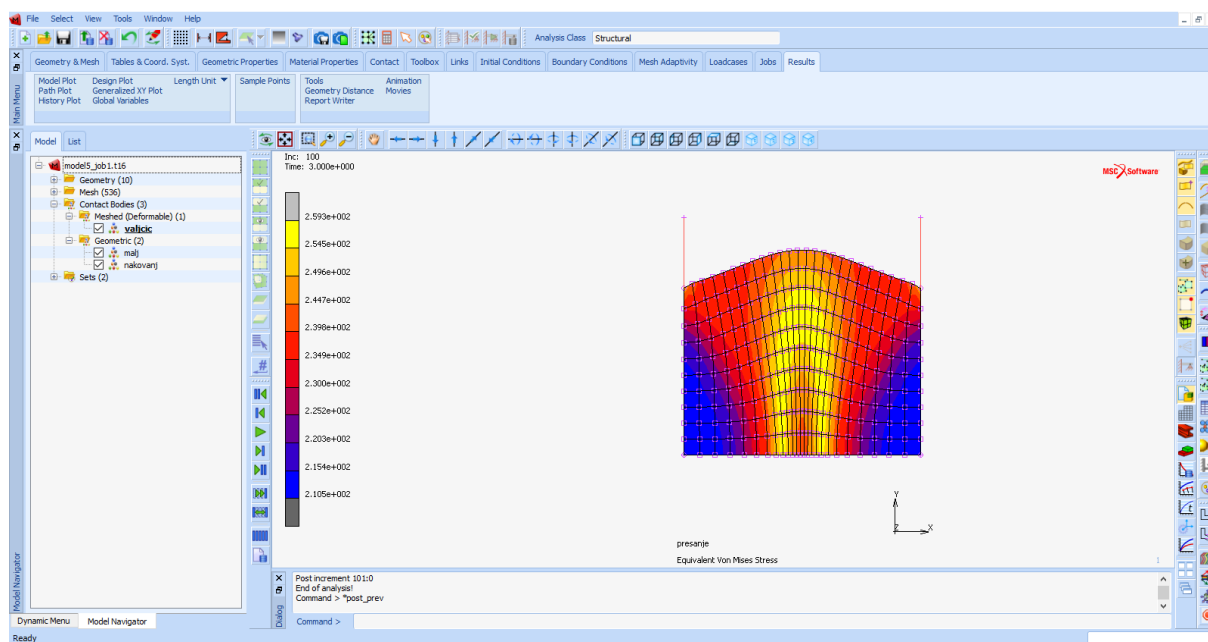


**Slika 47. Simulacija sabijanja aluminija gravitacijskim batom**

### 6.10.3. Prikaz sabijanja bakrene legure hidrauličnom prešom

Na slici 48 prikazani su rezultati računalne simulacije i prikaz raspodjele naprezanja prilikom sabijanja bakrene legure hidrauličnom prešom. Slično kao i do sada shema raspodjele naprezanja je jednaka slučajevima prije, raste vrijednost iznosa naprezanja od ruba prema sredini. Prilikom usporedbe s raspodjelom naprezanja prilikom sabijanja aluminija hidrauličnom prešom vidljivo je da imamo ravnomjerniji raspored naprezanja kod aluminija, međutim iznos naprezanja kod bakrene legure je veći, jer je veći modul elastičnosti.

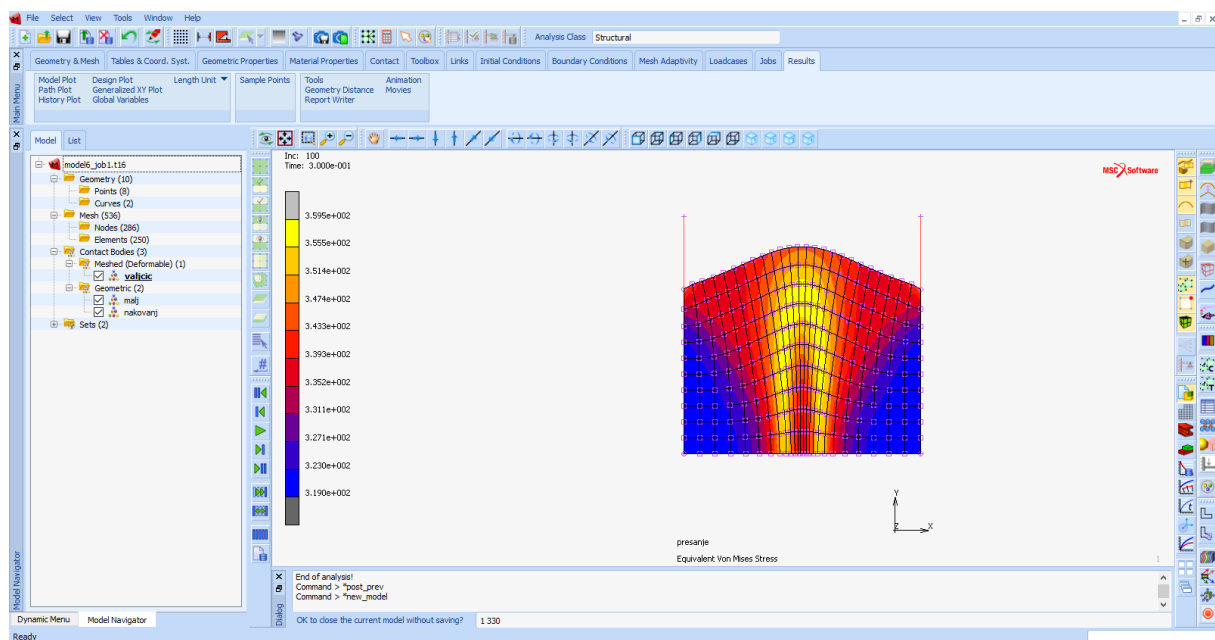




Slika 48. Simulacija sabijanja bakrene legure hidrauličnom prešom

#### 6.10.4. Prikaz sabijanja bakrene legure gravitacijskim batom

Rezultati računalne simulacije i prikaz raspodjele napreznja prilikom sabijanja bakrene legure gravitacijskim batom prikazani su na slici 49. Ako usporedimo raspodjelu napreznja bakrene legure na gravitacijskom batom i hidrauličnoj preši vidljivo je da imamo sličnu raspodjelu napreznja. Raspodjela napreznja ravnomjernija je kod hidraulične preše no iznos napreznja veći je kod sabijanja na gravitacijskom batom zato što je veća i brzina deformiranja.



Slika 49. Simulacija sabijanja bakrene legure gravitacijskim batom

## 7. ZAKLJUČAK

Kovanje spada među najraširenije i najstarije načine obrade metala. Sabijanje je postupak slobodnog kovanja kod kojeg se visina materijala smanjuje a povećava se poprečni presjek. Sabijanje se često koristi za određivanje naprezanja u materijalu tijekom procesa oblikovanja deformiranjem, međutim može se koristiti i za određivanje vrijednosti koeficijenta trenja.

U ovom radu opisan je proces sabijanja aluminijskih i bakrenih valjčića na hidrauličnoj preši i gravitacijskom batu, te kako deformiranje utječe na svojstva materijala. Postupak je proveden na 5 uzoraka za svaki materijal na svakom od strojeva. Nakon sabijanja provedena su ispitivanja tvrdoće koristeći HV 10 metodu da se utvrdi utjecaj deformacije na tvrdoću. Prema prikazanim mjerenjima događa se povećanje tvrdoće oba materijala s povećanjem logaritamskog stupnja deformacije uzorka. Ovo povećanje tvrdoće sukladno je opisanoj teoriji gibanja dislokacija u metalnom materijalu tijekom procesa plastične deformacije. Pokazano je da se materijalu hladnom plastičnom deformacijom povećava tvrdoća. Međutim, prilikom mjerenja tvrdoće neki sabijeni uzorci imaju manju tvrdoću od reprezentativnih nesabijenih uzoraka, što nije moguće jer se sabijanjem tvrdoća uvijek povećava. Ovakvi rezultati su dobiveni zbog nedovoljno dobro obrađene površine na kojoj su mjereni rezultati, ali i zbog subjektivnosti mjeritelja. Ispunjeno je očekivanje da je veća tvrdoća kod uzoraka ispitivanih na batu u odnosu na uzorke ispitane na preši jer je puno veća brzina deformacije kod gravitacijskog bata.

Računalnom simulacijom u MSC Marc Mentat programu simulirani su procesi sabijanja kako bi se vidjeli rasporedi naprezanja na uzorcima. Simulacija je pokazala očekivani raspored naprezanja prema kojem je najveće naprezanje tamo gdje je najveća deformacija te najveće izobličenje uzorka, a najmanje naprezanje na dodirnim površinama uzorka. Oba materijala, aluminij i bakrena legura imaju veći iznos Von Misesovog naprezanja na batu nego na preši jer je veća brzina deformiranja. Također veći je iznos naprezanja kod bakrene legure jer ima veći modul elastičnosti te veća naprezanja plastičnog tečenja s obzirom na stupanj deformacije. Uspoređujući aluminij na batu i na preši, aluminij na preši ima pravilniji raspored naprezanja jer je manja brzina deformiranja, ali i manji iznos naprezanja.

**LITERATURA**

- [1] Rešković S. Teorija oblikovanja deformiranjem. Sisak: Metalurški fakultet; 2014.
- [2] Musafija B. Obrada metala plastičnom deformacijom. Sarajevo: IGKRO svjetlost OOUR zavod za udžbenike; 1979.
- [3] Piljek P. Model plitkog gravurnog kovanja temeljen na veličini kristalnog zrna [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.
- [4] Math M. Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 1999.
- [5] Materijali katedre za oblikovanje deformiranjem, FSB Zagreb; dostupno na [https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/on\\_line\\_materijali.htm](https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/on_line_materijali.htm), pristup 10. veljače 2022. godine
- [6] Pustaić D, Cukor I. Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti, sažetak predavanja, elektroničko izdanje, dostupno na web stranicama Zavoda za tehničku mehaniku, Zagreb, 2009.
- [7] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Ćurković L. Materijali 1. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014.
- [8] <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~atonejc/3%20NNDefekti%20kristalne%20resetke.pdf>, pristup 23. veljače 2022. godine
- [9] Gabrić I, Šitić S, Materijali 1. Split. Sveučilišni odjel za stručne studije; dostupno na [https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI\\_1\\_skripta\\_listopad\\_2013.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf), pristup 23. veljače 2022. godine
- [10] Hull D, Bacon D.J., Introduction to dislocations 5th edition. University of Liverpool: Elsevier; 2011.
- [11] [https://www.researchgate.net/figure/Definition-of-Burgers-vector-a-current-configuration-b-crystal-reference\\_fig2\\_253090243](https://www.researchgate.net/figure/Definition-of-Burgers-vector-a-current-configuration-b-crystal-reference_fig2_253090243) (pristup 4. ožujka 2022. godine)
- [12] Iljkić D. Prilog razvoju procjene mehaničkih svojstava poboljšanog čelika i čeličnog lijeva [doktorski rad]. Rijeka: Tehnički fakultet; 2010.
- [13] Stubičar M. Mehanizmi poboljšanja čvrstoće aluminija i aluminijskih legura [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [14] [https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi\\_2021/15-101-106\\_Horvat\\_DTZSB2021.pdf](https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi_2021/15-101-106_Horvat_DTZSB2021.pdf) (pristup 12. svibnja 2022.godine)
- [15] [https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/Slobodno\\_kovanje\\_celika.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/Slobodno_kovanje_celika.pdf) (pristup 14. svibnja 2022.)

---

[16] <http://tspupin.org/online2203/I-10%20Prakti%C4%8Dna%20nastava.pdf>

(pristup 14. svibnja 2022.)

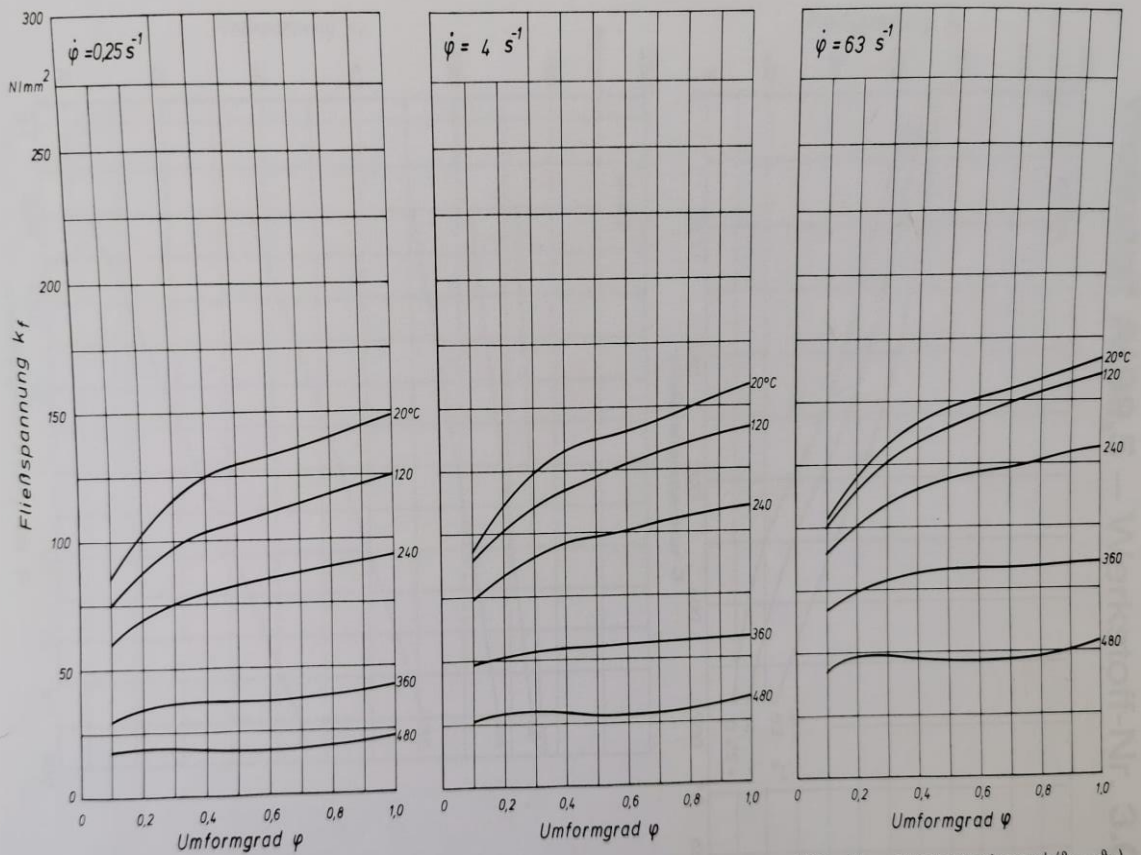
[17] Keran Z. Predavanja iz kolegija Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.

---

**PRILOZI**

- I. Krivulja plastičnog tečenja materijala Al 99,5
- II. Krivulja plastičnog tečenja materijala CuAl5

# Werkstoff Al99,5 – Werkstoff-Nr. 3.0255



Zusammensetzung (Gew.-%): 0,01 Cu;  
 0,026 Mn; 0,033 Mg; 0,092 Si; 0,23 Fe;  
 0,01 Zn  
 Zustand:

$R_m$ :  
 $R_b$ :  
 HB:  
 $A_5$ :  
 Z:

Prüfverfahren: Zylinderstauchversuch ( $\dot{\psi}_w = \dot{\psi}_s$ )  
 Prüfeinrichtung: Plastometer  
 Probenabmessungen:  $\varnothing 11 \times 18$  mm  
 Schmierstoff: s. Schmierplan  
 Quelle: Al 2

121

