

Analitički i eksperimentalni pristup sabijanju cilindričnih uzoraka

Ruk, Ivan

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:235:999430>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Ruk

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Zdenka Keran, dipl. ing.

Student:

Ivan Ruk

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Zdenki Keran, dipl. ing. na nesebičnoj pomoći, izdvojenom vremenu te brojnim savjetima i velikom strpljenju. Posebno hvala obitelji i prijateljima na svim savjetima i podršci.

Ivan Ruk



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: **IVAN RUK**

Mat. br.: 0035207069

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analitički i eksperimentalni pristup sabijanju cilindričnih uzoraka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analytical and experimental approach to upsetting of cylindrical samples**

Opis zadatka:

Postupak dimenzioniranja kovačkog stroja za novi proces kovanja temelji se na proračunu maksimalne sile oblikovanja deformiranjem koja se javlja u procesu ili na proračunu ukupnog rada oblikovanja deformiranjem. Različiti analitički pristupi rezultiraju i različitim iznosima sila odnosno radova oblikovanja. U radu je potrebno odabrati dvije legure predviđene za oblikovanje deformiranjem. Analizira se postupak aksijalnog slobodnog sabijanja cilindričnih uzoraka. Za predviđene uzorke potrebno je izračunati silu oblikovanja putem dva analitička pristupa – korištenjem maksimalnog napreznja plastičnog tečenja te korištenjem srednjeg napreznja plastičnog tečenja za različite iznose logaritamskog stupnja deformacije. Nadalje, potrebno je eksperimentalno obraditi navedeni postupak. Uzorke je potrebno sabijati pomoću hidraulične preše te za različite iznose logaritamskog stupnja deformacije očitavati silu sabijanja (deformiranja). Usporediti i komentirati analitičke i eksperimentalne rezultate. Preporučiti minimalne karakteristike stroja za provođenje procesa. Postupak sabijanja obraditi simulacijom pomoću jednog od komercijalnih programskih paketa za numeričku simulaciju velikih deformacija. Tumačiti raspored napreznja u materijalu i dobiveni oblik sabijenog uzorka. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 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.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVNI POJMOVI OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM.....	3
2.1. Stalnost volumena	3
2.2. Stupanj deformacije	3
2.3. Brzina deformacije	4
2.4. Naprezanje plastičnog tečenja.....	6
2.5. Rad deformacije	6
2.6. Uvjet plastičnog tečenja	7
3. TEHNOLOGIJA KOVANJA.....	9
3.1. Slobodno kovanje.....	10
3.1.1. Sabijanje.....	11
3.1.2. Iskivanje i raskivanje	12
3.1.3. Probijanje	12
3.1.4. Zasijecanje	13
3.1.5. Savijanje.....	13
3.2. Kovanje u ukovnjima	14
3.3. Kovački strojevi	15
3.3.1. Batovi.....	16
3.3.1.1. Mehanički batovi	16
3.3.2. Preše.....	17
3.3.2.1. Hidraulične preše	17
3.4. Strojevi sa garantiranom silom deformiranja.....	19
3.5. Strojevi sa garantiranim hodom alata.....	19
3.6. Strojevi sa garantiranim radom deformacije	19
4. METODE SNIMANJA KRIVULJA PLASTIČNOG TEČENJA.....	21
4.1. Metoda prema H. Lippmannu	21
4.2. Metoda prema S. Gubkinu	24
4.3. Metoda prema K. Reicherteru	24
5. EKSPERIMENTALNI DIO	27
5.1. Ispitivanje cilindričnih uzoraka na gravitacijskom batu	28
5.1.1. Sabijanje uzoraka legure AlMg3	29
5.1.2. Sabijanje uzoraka legure AlMgSi1	34
5.1.3. Sabijanje uzoraka AlCuBiPb	37
5.2. Ispitivanje cilindričnih uzoraka na hidrauličnoj preši.....	40

5.2.1. Sabijanje uzoraka legure AlMg3	40
5.2.2. Sabijanje uzoraka legure AlMgSi1	43
5.2.3. Sabijanje uzoraka AlCuBiPb	46
6. RAČUNALNA SIMULACIJA	51
6.1. Sabijanje cilindričnog uzorka materijala AlMg3	52
6.2. Sabijanje cilindričnog uzorka materijala AlMgSi1	54
6.3. Sabijanje cilindričnog uzorka materijala AlCuBiPb	56
7. ZAKLJUČAK.....	58
LITERATURA.....	59

POPIS SLIKA

Slika 1.	Promjene dimenzija prizme prilikom tlačenja silom F [3].....	3
Slika 2.	Dijagram brzine alata bata i preše [2]	5
Slika 3.	Dijagram brzine deformacije bata i preše [2]	5
Slika 4.	Krivulja razvlačenja i krivulja plastičnog tečenja [6].....	6
Slika 5.	Slobodno kovanje i kovanje u ukovnjima [10]	11
Slika 6.	Postupak iskivanja [9]	12
Slika 7.	Postupak raskivanja [9]	12
Slika 8.	Postupak probijanja [2]	13
Slika 9.	Postupak zasijecanja [2]	13
Slika 10.	Postupak savijanja [2]	13
Slika 11.	Postupno oblikovanje osovine različitih poprečnih presjeka [2].....	14
Slika 12.	Izvedbe mehaničkih gravitacijskih batova: a) bat sa daskom, b) bat sa remenom, c) bat sa lancem, d) bat sa klipom [1].....	17
Slika 13.	Hidraulična preša [13]	18
Slika 14.	Strojevi sa garantiranom silom deformiranja [2]	19
Slika 15.	Strojevi sa garantiranim hodom alata [2]	19
Slika 16.	Strojevi sa garantiranim radom odnosno energijom deformacije [2].....	20
Slika 17.	Paralelopiped i elementarni volumen sa naprezanjima [2]	22
Slika 18.	Raspored specifičnog pritiska na tlačnoj površini pravokutne prizme [2].....	23
Slika 19.	Gravitacijski bat	27
Slika 20.	Hidraulična preša.....	28
Slika 21.	Cilindrični uzorci nakon sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMg3	29
Slika 22.	Grafički prikaz sila sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMg3	33
Slika 23.	Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMg3	34
Slika 24.	Cilindrični uzorci nakon sabijanja batom, legura AlMgSi1	34
Slika 25.	Grafički prikaz sila sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMgSi1	36
Slika 26.	Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMgSi1	37
Slika 27.	Cilindrični uzorci nakon sabijanja batom, legura AlCuBiPb.....	37
Slika 28.	Grafički prikaz sila sabijanja gravitacijskim batom, legura AlCuBiPb	39
Slika 29.	Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja gravitacijskim batom, legura AlCuBiPb	40
Slika 30.	Cilindrični uzorci nakon sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMg3	41
Slika 31.	Grafički prikaz sila sabijanja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMg3	43
Slika 32.	Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMg3	43
Slika 33.	Cilindrični uzorci nakon sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1	44
Slika 34.	Grafički prikaz sila sabijanja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1	46
Slika 35.	Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1	46
Slika 36.	Cilindrični uzorci nakon sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb.....	47
Slika 37.	Grafički prikaz sila sabijanja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb	49
Slika 38.	Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb	49

Slika 39.	Konstrukcija cilindričnog uzorka sa mrežom konačnih elemenata.....	51
Slika 40.	Radni i povratni hod alata hidraulične preše	52
Slika 41.	Krivulja tečenja materijala AlMg3	53
Slika 42.	Naprezanja AlMg3	54
Slika 43.	Krivulja tečenja materijala AlMgSi1	55
Slika 44.	Naprezanja AlMgSi1	55
Slika 45.	Krivulja tečenja materijala AlCuBiPb.....	56
Slika 46.	Naprezanje AlCuBiPb	57

POPIS TABLICA

Tablica 1. Konačna visina uzoraka ovisno o visini podizanja malja, legura AlMg3	29
Tablica 2. Izračunate vrijednosti sabijanja na batu, legura AlMg3	30
Tablica 3. Sile sabijanja i energije deformiranja na batu, legura AlMg3	33
Tablica 4. Konačna visina uzoraka ovisno o visini podizanja malja, legura AlMgSi1	35
Tablica 5. Izračunate vrijednosti sabijanja na batu, legura AlMgSi1	35
Tablica 6. Sile sabijanja i energije deformiranja na batu, legura AlMgSi1	36
Tablica 7. Konačna visina uzoraka ovisno o visini podizanja malja, legura AlCuBiPb	38
Tablica 8. Izračunate vrijednosti sabijanja na batu, legura AlCuBiPb	38
Tablica 9. Sile sabijanja i energije deformiranja na batu, legura AlCuBiPb	39
Tablica 10. Korištena sila za sabijanje uzoraka na određenu visinu, legura AlMg3	41
Tablica 11. Energija sabijanja cilindričnih uzoraka hidrauličnom prešom, legura AlMg3	42
Tablica 12. Sile sabijanja i energije deformiranja na preši, legura AlMg3	42
Tablica 13. Korištena sila za sabijanje uzoraka na određenu visinu, legura AlMgSi1	44
Tablica 14. Energija sabijanja cilindričnih uzoraka hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1 ..	45
Tablica 15. Sile sabijanja i energije deformiranja na preši, legura AlMgSi1	45
Tablica 16. Korištena sila za sabijanje uzoraka na određenu visinu, legura AlCuBiPb	47
Tablica 17. Energija sabijanja cilindričnih uzoraka hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb ..	47
Tablica 18. Sile sabijanja i energije deformiranja na preši, legura AlCuBiPb	48
Tablica 19. Odnos vremena i brzine hidraulične preše	51
Tablica 20. Krivulja tečenja materijala AlMg3	52
Tablica 21. Krivulja tečenja materijala AlMgSi1	54
Tablica 22. Krivulja tečenja materijala AlCuBiPb	56

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
a_0	mm	početna duljina tijela
a	mm	duljina tijela
A_0	mm ²	početna površina poprečnog presjeka
a_1	mm	konačna duljina tijela
A_1	mm ²	konačna površina poprečnog presjeka
A_{\max}	mm ²	maksimalna konačna površina poprečnog presjeka
b	mm	širina tijela
b_0	mm	početna širina tijela
b_1	mm	konačna širina tijela
d_0	mm	početni promjer tijela
d_{\max}	mm	maksimalni konačni promjer tijela
F	N	sila sabijanja
g	m/s ²	ubrzanje sile teže
G	N	težina tijela
h	mm	visina tijela
h_0	mm	početna visina tijela
h_1	mm	konačna visina tijela
k_f	N/mm ²	naprezanje plastičnog tečenja
k_{fm}	N/mm ²	srednje naprezanje plastičnog tečenja
m	kg	masa tijela
p_x	N/mm ²	specifični pritisak na mjestu x
r_0	mm	početni polumjer tijela
r_{\max}	mm	maksimalni konačni polumjer tijela
V_0	mm ³	početni volumen tijela
V_1	mm ³	konačni volumen tijela
w	mJ/mm ³	specifični rad deformacije
W	J	energija (rad) deformiranja
x	mm	udaljenost
ε	mm/mm	relativna deformacija
μ		faktor kontaktnog trenja
ρ_a	mm	polumjer zaobljenja plašta nakon sabijanja
σ_l	N/mm ²	glavno naprezanje
τ_{\max}	N/mm ²	maksimalno tangencijalno naprezanje
φ		logaritamski stupanj deformacije
φ_a		logaritamski stupanj deformacije u smjeru duljine
φ_b		logaritamski stupanj deformacije u smjeru širine
φ_h		logaritamski stupanj deformacije u smjeru visine

SAŽETAK

Postupci oblikovanja deformiranjem su postupci oblikovanja metala plastičnom deformacijom koji uključuju utiskivanje, valjanje, ekstruziju i kovanje metala. Sabijanje metala spada u podvrstu kovanja.

U ovome radu ukratko su opisani osnovni pojmovi oblikovanja deformiranjem kao što su stalnost volumena, stupanj deformacije, brzina deformacije, naprezanje plastičnog tečenja i rad deformacije. Također opisana je sama tehnologija kovanja uz naglasak na sabijanje materijala. Analiziran je postupak aksijalnog slobodnog sabijanja cilindričnih uzoraka 3 aluminijskih legura. Izračunata je potrebna sila sabijanja cilindričnih uzoraka korištenjem maksimalnog naprezanja plastičnog tečenja te korištenjem srednjeg naprezanja plastičnog tečenja za različite iznose logaritamskog stupnja deformacije.

Navedeni analizirani postupak je obrađen i eksperimentalno gdje su cilindrični uzorci najprije aksijalno slobodno sabijeni na gravitacijskom batu, a zatim i na hidrauličnoj preši. Na gravitacijskom batu pratila se energija tj. rad sabijanja, dok se prilikom sabijanja hidrauličnom prešom očitavala sila sabijanja. Također uspoređeni su analitički i eksperimentalni rezultati.

Pomoću softvera MSC Marc Mentat simuliran je postupak sabijanja cilindričnih uzoraka svih 3 aluminijskih legura s ciljem prikazivanja rasporeda naprezanja te oblika sabijenih uzoraka.

Ključne riječi: cilindrični uzorak, sabijanje, deformacija, simulacija

SUMMARY

Metal forming is a series of techniques in which metals are plastically deformed and they include: impressing, rolling, extrusion and forging. Upsetting of metals is considered a type of forging.

In this master's thesis, basic terms related to metal forming such as permanence of volume, degree of deformation, speed of deformation, plastic yield stress and energy of deformation are described in brief. Technology of forging with an emphasis on upsetting is portrayed as well. Procedure of upsetting with free axial deformation of cylindrical samples made of three aluminum alloys is analyzed. Upsetting force needed for deforming cylindrical samples is calculated using maximum plastic yield stress and mean plastic yield stress for different values of logarithmic degree of deformation.

Listed analyzed procedure is also processed experimentally where cylindrical samples are firstly subjugated to free axial deformation caused by an impact of gravitational hammer and then deformed on hydraulic press. Upsetting energy was monitored in the part of the experiment that includes gravitational hammer and upsetting force was kept track of in the part of the experiment that includes hydraulic press. Analytical and experimental results are compared in this master's thesis. With the help of MSC Marc Mentat software, procedure of upsetting all three cylindrical samples made of different aluminum alloys is simulated with a goal of showcasing stress distribution and geometrical shape of upsetted samples.

Key words: cylindrical samples, upsetting, deformation, simulation

1. UVOD

Pojam oblikovanje metala odnosi se na skupinu proizvodnih metoda kojima se materijal, obično bezobličan ili jednostavne geometrije, pretvara u koristan oblik bez promjene mase ili sastava materijala. Taj dio obično ima složenu geometriju s dobro definiranim oblikom, veličinom, točnošću i tolerancijama, izgledom i svojstvima [1].

Proizvodnja metalnih dijelova i sklopova može se, pojednostavljeno razvrstati u pet općih područja [1]:

- Primarni postupci oblikovanja, kao što su lijevanje, ekstruzija taline, lijevanje pod pritiskom i prešanje metalnog praha. U svim ovim procesima, materijal nema oblik, ali kroz proces dobiva dobro definiranu geometriju.
- Postupci oblikovanja metala kao što su valjanje, ekstruzija, hladno i toplo kovanje, savijanje i duboko vučenje, gdje se materijal oblikuje plastičnom deformacijom.
- Postupci rezanja metala, poput piljenja, tokarenja, glodanja i provlačenja, gdje se uklanjanjem metala stvara novi oblik.
- Postupci obrade materijala, kao što su toplinska obrada, anodiziranje i površinsko otvrdnjavanje, gdje oblik ostaje nepromijenjen, ali se mijenjaju svojstva ili izgled dijela.
- Postupci spajanja, uključujući metalurško spajanje, kao što su spajanje zavarivanjem i difuzijsko spajanje, i mehaničko spajanje, kao što je zakivanje i mehaničko sastavljanje. Metalurški postupci spajanja, kao što su spajanje zavarivanjem, tvrdo lemljenje i lemljenje, tvore trajan i robustan spoj između komponenti. Mehanički postupci spajanja, poput zakivanja i mehaničkog sastavljanja, spajaju dva ili više dijelova u podsklop koji se lako može rastaviti.

Među svim proizvodnim procesima, tehnologija oblikovanja metala deformiranjem ima posebno mjesto jer pomaže u proizvodnji dijelova vrhunskih mehaničkih svojstava uz minimalan gubitak materijala. Kod oblikovanja metala početni materijal ima relativno jednostavnu geometriju. Materijal se plastično deformira u jednoj ili više operacija u proizvod relativno složene geometrije. Oblikovanje do dimenzija koje su po veličini i obliku bliske gotovom proizvodu drastično smanjuje zahtjeve za dodatnim uklanjanjem metala, što rezultira značajnom uštedom materijala i energije. Oblikovanje metala obično zahtijeva relativno skupe

alate. Stoga je postupak ekonomski privlačan samo kada se mora proizvesti veliki broj dijelova i/ili kada se mehanička svojstva potrebna u gotovom proizvodu mogu postići samo postupkom oblikovanja [1].

Oblikovanje metala uključuje veliki broj proizvodnih procesa koji proizvode industrijske proizvode, kao i potrošačku robu. Ovi procesi uključuju masivne operacije kao što su kovanje, valjanje i izvlačenje, i procese oblikovanja limova, kao što su oblikovanje savijanjem, duboko vučenje i oblikovanje rastezanjem. Za razliku od strojne obrade, procesi oblikovanja metala ne uključuju opsežno uklanjanje metala da bi se postigao željeni oblik izratka. Proces oblikovanja često se koriste zajedno s drugim proizvodnim procesima, kao što su strojna obrada, brušenje i toplinska obrada, kako bi se dovršila transformacija od sirovog materijala do gotovog izratka spremnog za montažu. Poželjna svojstva materijala za oblikovanje uključuju nisku granicu tečenja i visoku duktilnost. Na ta svojstva utječu temperatura i brzina deformacije. Povećanjem radne temperature duktilnost se povećava, a granica tečenja se smanjuje. Učinak temperature dovodi do razlike između hladnog oblikovanja (obradak je na početku na sobnoj temperaturi), polutoplog oblikovanja (obradak je zagrijan iznad sobne temperature, ali ispod temperature rekristalizacije materijala obratka) i toplog oblikovanja (obradak je zagrijan iznad temperature rekristalizacije). Na primjer, granica tečenja metala raste s povećanjem naprezanja (deformacije) tijekom hladnog oblikovanja. Kod toplog oblikovanja, granica tečenja, općenito raste s naprezanjem (deformacijom) [1].

Postupci oblikovanja se koriste u sljedećim slučajevima :

- Geometrija dijela je umjerene složenosti, proizvodnja je velikoserijska, tako da troškovi alata po jedinici proizvoda mogu biti niski.
- Svojstva dijelova i metalurški integritet su iznimno važni.

Projektiranje, analiza i optimizacija procesa oblikovanja zahtijevaju:

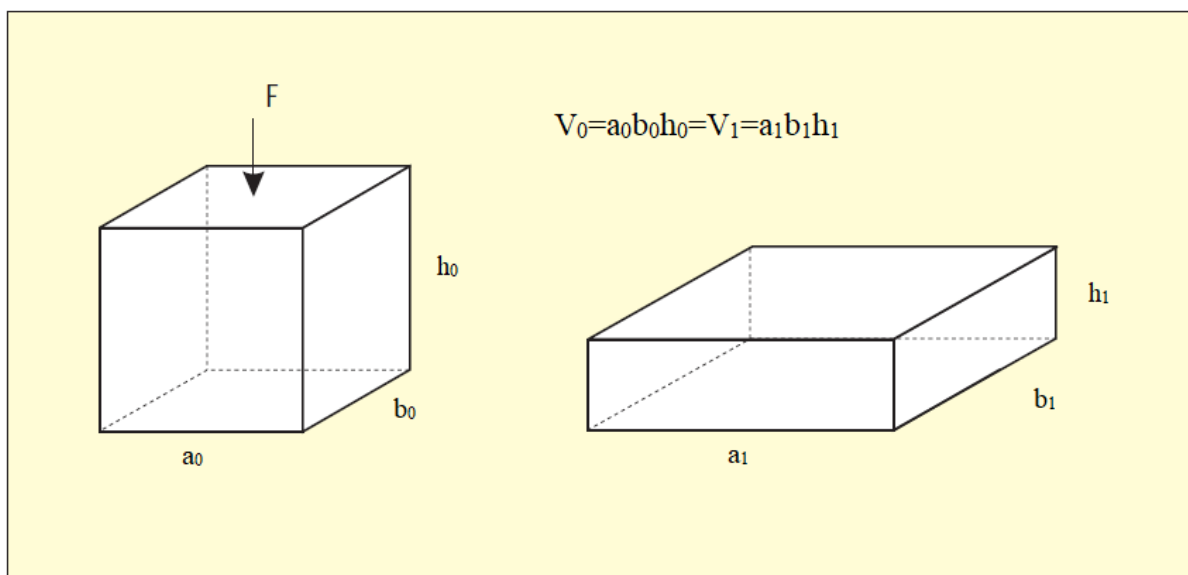
- Inženjersko znanje o tečenju metala, napreznjima te prijenosu topline.
- Tehnološke informacije koje se odnose na tehnike podmazivanja, grijanja i hlađenja, rukovanja materijalom, dizajn kalupa i opremu za oblikovanje.

Razvoj tehnologije oblikovanja povećao je raspon oblika, veličina i svojstava oblikovanih proizvoda što im omogućuje različite zahtjeve dizajna i izvedbe. Posebno su potrebni oblikovani dijelovi kada su bitna svojstva kao čvrstoća, pouzdanost, ekonomičnost, otpornost na udarce i zamor [1].

2. OSNOVNI POJMOVI OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM

2.1. Stalnost volumena

Pretpostavlja se da volumen materijala prilikom plastične deformacije ostaje konstantan. Ta aproksimacija slijedi iz Bridgmanovih pokusa te nije daleko od istine. Pokazalo se kako se i prilikom visokih svestranih pritisaka kod stlačivanja uzoraka tlakom od 10^5 MPa, promjene volumena u slučaju čeličnog materijala iznose svega 0,6 %, bakrenog 0,7 %, a aluminijskog materijala 1,3 %. Te vrijednosti mogu biti nešto veće za materijale s izraženijom poroznošću prilikom sabijanja posve sitnih šupljina pod visokim tlakom. Ipak u većini slučajeva ta je promjena volumena toliko mala da je zanemariva te je pretpostavka o konstantnosti volumena opravdana. Na temelju ove pretpostavke izvedene su definicije stupnja deformacije, obujma istisnutog materijala i brzina deformacije [2].



Slika 1. Promjene dimenzija prizme prilikom tlačnja silom F [3]

2.2. Stupanj deformacije

Prilikom djelovanja vanjskih sila na materijal dolazi do promjene njegovih dimenzija, poprečnih presjeka i volumena, kod postupaka oblikovanja deformiranjem navedene promjene izražavamo stupnjevima deformacije. Prilikom sabijanja prizme vanjskom silom F dolazi do preoblikovanje prizme početnih dimenzija h_0 , a_0 , b_0 na dimenzije h_1 , a_1 , b_1 bez promjene volumena, što je prikazano na slici 1 [2].

$$V_0 = V_1 = konst.$$

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

$$\ln \frac{h_0}{h_1} + \ln \frac{b_0}{b_1} + \ln \frac{a_0}{a_1} = 0 \quad \text{ili}$$

$$\varphi_h + \varphi_a + \varphi_b = 0$$

(1)

Veličine φ_h , φ_a , φ_b nazivaju se logaritamski stupnjevi deformacije, prema (1) njihova je suma uvijek jednaka nuli, što znači da uz pozitivne postoje i negativni stupnjevi deformacije. Kako je vidljivo na slici 1 da su dimenzije $h_0 > h_1$, $a_0 < a_1$, $b_0 < b_1$, jedino će stupanj deformacije u smjeru visine biti veći od nule, dok će stupnjevi u smjeru širine i duljine biti manji od nule [2].

Prema tome:

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

(2)

Prema jednadžbi (2) logaritamski stupanj deformacije φ_h u smjeru djelovanja sile F je apsolutno gledano najveći.

Pošto je stupanj deformacije najveći u smjeru djelovanja sile, uveden je pojam glavne logaritamske deformacije, a to je ona koja se u pojedinom procesu uvodi kao relevantna za proračun.

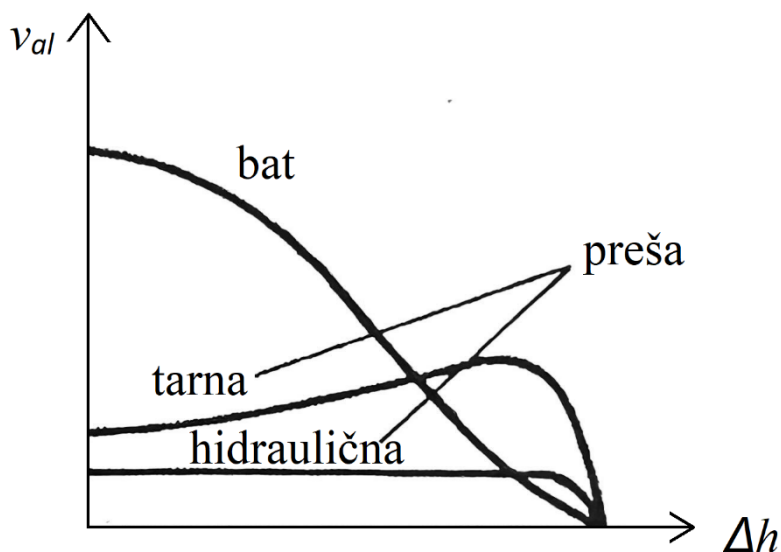
$$\varphi_h = \ln \frac{h_0}{h_1}$$

(3)

2.3. Brzina deformacije

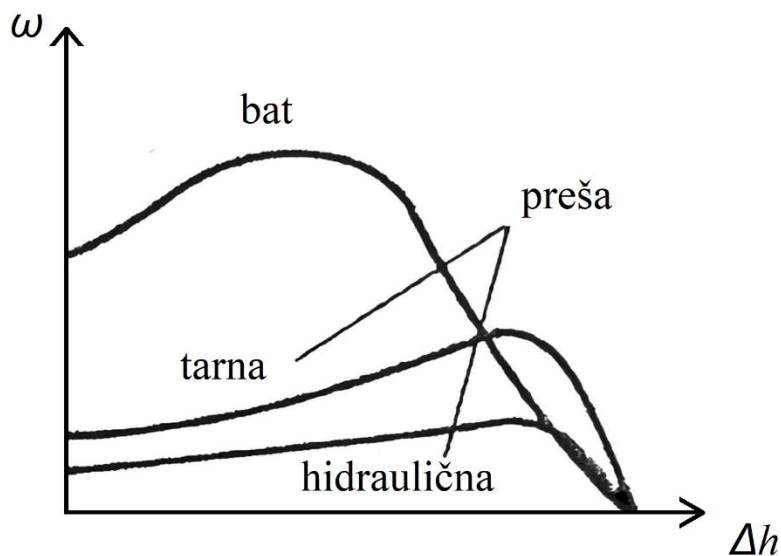
Kod postupaka oblikovanja deformiranjem potrebno je razlikovati brzinu deformacije od brzine deformiranja. Brzina deformacije predstavlja brzinu kretanja čestica materijala koji se deformira dok brzina deformiranja ovisi o stroju na kojem se obradak deformira te predstavlja brzinu kretanja alata [4].

Brzina deformiranja tj. brzina kretanja alata tijekom procesa je promjenjiva što je vidljivo na slici 2. Na priloženoj slici nalazi se dijagram brzine alata bata te hidraulične i tarne vretenaste preše. Vidljivo je kako je brzina alata kod bata najveća na početku deformiranja tj. prilikom sraza malja i obratka te tijekom daljnjeg deformiranja prema krivulji brzina pada prema nuli odnosno visini h_1 , kada je postupak sabijanja završen. Prilikom sabijanja hidrauličnom prešom brzina deformiranja je konstantna te se na kraju procesa sabijanja naglo smanjuje do nule. Ako se pak deformiranje odvija na tarnoj vretenastoj preši tokom putanje alata brzina raste te u nekom trenutku postiže svoj maksimum, a zatim poput gravitacijskoj bata opada prema nuli [2].



Slika 2. Dijagram brzine alata bata i preše [2]

Brzina deformacije materijala ovisi o brzini alata te dimenzijama komada koji se deformira. Prilikom iste brzine alata, brzina deformacije je veća ukoliko je početna visina obratka manja. Brzina gibanja pojedinih čestica će biti različita tijekom deformiranja zbog toga što čestice prelaze različitu duljinu puta u istom vremenu. Pomoću poznatog tijeka brzine deformiranja može se pratiti promjena brzine deformacije. Brzine deformacije za bat, hidrauličnu i tarnu vretenastu prešu prikazane su na slici 3. Vidljivo je kako se brzine deformacija materijala kod hidraulične i tarne vretenaste preše malo razlikuju, ali nikako nisu jednake kao brzine deformiranja, dok se kod bata najviše razlikuju brzina deformacije materijala u odnosu na brzinu deformiranja [2], [5].



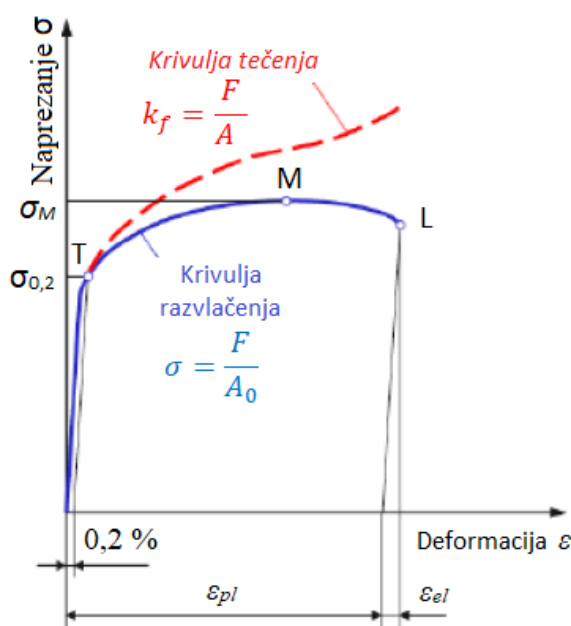
Slika 3. Dijagram brzine deformacije bata i preše [2]

2.4. Naprezanje plastičnog tečenja

Naprezanje plastičnog tečenja definira se kao vlačno ili tlačno naprezanje potrebno da u deformirajućem materijalu nastanu trajne plastične deformacije. Što znači prijelaz iz elastičnog u plastično područje.

Naprezanje plastičnog tečenja funkcija je materijala, stupnja deformacije, brzine deformacije te temperature. Prilikom sabijanja cilindričnog uzorka tj. ispitivanje na tlak u hladnome stanju preko trenutnog omjera sile i presjeka cilindra te poznate krivulje razvlačenja prikazane na slici 4, može se doći do krivulje odnosno dijagrama naprezanja plastičnog tečenja kao krivulje stvarnog naprezanja [2].

Dobivene vrijednosti naprezanja predstavljaju naprezanja plastičnog tečenja u ovisnosti o stupnju deformacije. Svaka točka na krivulji predstavlja naprezanje tečenja za odgovarajuću relativnu deformaciju ε . Prilikom prekida sabijanja, naprezanje plastičnog tečenja predstavlja granicu popuštanja, te kod ponovnog sabijanja materijal će nastaviti plastično tečenje. Te krivulje koje prikazuju promjenu naprezanja i granice popuštanja u ovisnosti o stupnju deformacije nazivaju se krivulje plastičnog tečenja [2].



Slika 4. Krivulja razvlačenja i krivulja plastičnog tečenja [6]

2.5. Rad deformacije

Rad plastične deformacije prilikom sabijanja prizme uzevši u obzir naprezanje plastičnog tečenja k_{fm} određen izrazom [2]:

$$w = \frac{W}{V_0} = k_{fm} \cdot \varphi \quad (4)$$

Gdje je:

- w – specifični rad deformacije, mJ/mm^3
- W – energija (rad) deformiranja, J
- V_0 – početni volumen tijela, mm^3
- k_{fm} – srednje naprezanje plastičnog tečenja, N/mm^2
- φ – logaritamski stupanj deformacije,-

Međutim, iako je riječ o postupku u hladnom stanju, kada se radi o proračunu sile treba računati sa vrijednošću naprezanja plastičnog tečenja k_φ na kraju procesa, a za postupke obrade u toplom stanju potrebno je uzeti u obzir jači utjecaj brzine deformacije [2].

2.6. Uvjet plastičnog tečenja

Proces plastične deformacije događa se pri određenom naprezanju materijala. Materijal se elastično deformira pri manjem naprezanju dok do plastične deformacije dolazi kod većih naprezanja. Plastična deformacija nastaje tek kada se u materijalu stvori određeno napregnuto stanje te kada tangencijalna naprezanja dosegnu određenu veličinu, koja ovisi o materijalu i uvjetima deformacije. Tangencijalna naprezanja moraju biti dovoljno velika da savladaju unutarnji otpor deformacije na kliznim ravninama [7].

Nije dovoljno samo postići napregnuto stanje u materijalu, jer to ne mora značiti da će doći do deformacije. Prilikom troosnog naprezanja sabijanja ako su sva tri glavna naprezanja jednaka ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) do deformacije neće doći zbog toga što su u tom slučaju tangencijalna naprezanja jednaka nuli. Najčešći odnos glavnih naprezanja je $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ [7].

Pri jednoosnom naprezanju ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) plastična deformacija nastaje kada glavno normalno naprezanje dostigne naprezanje plastičnog tečenja tj. kada je $\sigma_1 \geq k_f$. Tada vrijedi [7]:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sigma_1 = \frac{1}{2} k_f \quad (5)$$

Prema jednadžbi (5) plastična deformacija nastaje kada maksimalno tangencijalno naprezanje dostigne kritičnu vrijednost, koja je jednaka polovici naprezanja plastičnog tečenja. Teorije o plastičnom tečenju materijala u prostornom (dvoosnom, troosnom) stanju nastaju na osnovu rezultata jednoosnih eksperimenata.

Pri plastičnoj deformaciji umjesto naziva granica razvlačenja σ_v koristi se naziv naprezanje plastičnog tečenja k_f , to predstavlja stvarno naprezanje plastičnog tečenja kod jednoosnog naprezanja pri trenutnim uvjetima deformacije. To je tako zbog toga što se u teoriji plastične deformacije pod granicom razvlačenja podrazumijeva naprezanje koje se odnosi na površinu presjeka u trenutnom momentu i dovodi ga u plastično stanje u procesu ravnomjernog linijskog istezanja pri datoj temperaturi sa određenom brzinom i stupnjem deformacije.

3. TEHNOLOGIJA KOVANJA

Kovanje je plastična deformacija materijala uslijed djelovanja sile. Iz jednostavnog oblika, na primjer njegovim pritiskom između dva alata (ili matrice) dobiva se željeni konačni oblik. Dakle, jednostavna geometrija dijela transformira se u složenu. Procesi kovanja obično proizvode malo ili nimalo otpada stvaraju konačni oblik dijela u vrlo kratkom vremenu, obično u jednom ili nekoliko poteza preše ili bata. Kao rezultat toga, kovanje nudi potencijalne uštede energije i materijala, posebno u srednjim i velikim proizvodnim količinama, gdje se troškovi alata mogu lako amortizirati. Osim toga u nekim slučajevima, dijelovi proizvedeni kovanjem pokazuju bolja mehanička i metalurška svojstva i pouzdanost od onih proizvedenih lijevanjem ili strojnom obradom.

Fizičke fenomene koji opisuju operaciju kovanja teško je izraziti kvantitativno. Tečenje metala, trenje između alata i obratka, stvaranje topline i prijenos topline prilikom plastičnog tečenja, te odnosi između mikrostrukture, svojstava i procesnih uvjeta je teško predvidjeti i analizirati. Često je u proizvodnji potrebno nekoliko operacija kovanja kako bi se početni dio oblikovao u složeni, bez uzrokovanja značajnih oštećenja ili degradacije svojstava materijala [1].

Ključ uspješnog kovanja, odnosno dobivanje željenog oblika i svojstava je razumijevanje i kontrola tečenja metala. Smjer tečenja metala, veličina deformacije i prisutna temperatura uvelike utječu na svojstva oblikovanih obradaka. Tečenje metala određuje mehanička svojstva povezana s lokalnom deformacijom i stvaranjem defekata kao što su pukotine i nabori na površini ili ispod nje. Lokalni protok metala je pod utjecajem procesnih varijabli sažetih u nastavku [1]:

- sirovac:
 - naprezanje tečenja kao funkcija kemijskog sastava, metalurške strukture, veličine zrna, segregacije, prethodne deformacije, temperature deformacije, stupnja deformacije ili opterećenja, brzina deformacije ili opterećenja i mikrostrukture,
 - kovanje kao funkcija brzine opterećenja, temperature, brzine deformacije,
 - tekstura površine,
 - toplinska/fizikalna svojstva kao što su gustoća, specifična toplina, toplinska vodljivost, toplinsko širenje, otpornost na koroziju i oksidaciju,
 - početni uvjeti: sastav, temperatura, prednaprezanje,
 - veličina i debljina sirovca,

- alati/kalupi:
 - geometrija alata,
 - površinski uvjeti, podmazivanje,
 - obrada materijala, tvrdoća materijala, toplinska obrada ,
 - temperatura,
- uvjeti na površinama dodira između alata i obratka:
 - vrsta podmazivanja i temperatura,
 - karakteristike izolacije i hlađenja međusloja,
 - podmazivanje i smično naprezanje uslijed trenja,
 - karakteristike vezane uz primjenu i uklanjanje maziva,
- zona deformacije:
 - mehanika deformacije, model korišten za analizu,
 - tečenje metala, deformacija, brzina deformacije (kinematika),
 - naprezanja (varijacije tijekom deformacije),
 - temperature (stvaranje i prijenos topline),
- oprema:
 - produktivnost,
 - snaga, energija,
 - krutost i preciznost,
- proizvod:
 - geometrija,
 - dimenzijska točnost, tolerancije,
 - završna obrada,
 - mikrostruktura, metalurška i mehanička svojstva,
- okruženje:
 - raspoloživa radna snaga,
 - onečišćenje zraka, buka i otpadne vode,
 - postrojenje i proizvodni pogoni.

3.1. Slobodno kovanje

Slobodno kovanje je proces deformiranja komada metala između dvije matrice koje ne obuhvaćaju materijal u potpunosti. Oblik metala se mijenja dok matrice udaraju ili utiskuju materijal nizom pokreta dok se ne postigne željeni oblik. Otkovci oblikovani slobodnim

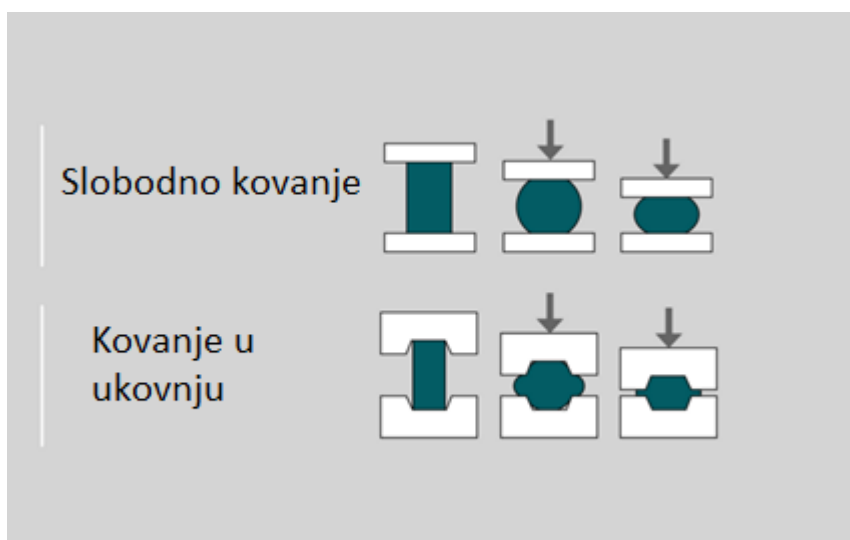
kovanjem često nakon kovanja trebaju strojnu obradu i pročišćivanje kako bi se postigle tolerancije potrebne za gotove proizvode. Slobodno kovanje koristi se za jednostavnije proizvode u malim serijama, kao što su diskovi, prstenovi, rukavci, cilindri i osovine. Prilagođeni oblici također se mogu proizvesti slobodnim kovanjem. Čvrstoća zrnate strukture će se povećati tijekom procesa deformacije. Još jedna od prednosti slobodnog kovanja je poboljšanje otpornosti na zamor i čvrstoća otkivka [1].

U procesu slobodnog kovanja najčešće se koriste standardni ravni, „V“ alat, konveksan ili konkavan alat. Postupak se koristi za oblikovanje sirovaca gotovo neograničenog raspona od nekoliko grama do preko nekoliko stotina tona. Najčešće se vrši slobodno kovanje u toplom stanju zbog poboljšanja karakteristika plastičnog tečenja i smanjenja potrebne sile za obradu sirovca povećanjem temperature sirovca, dok se rjeđe koristi kovanje u hladnom stanju. [8]

Postoji širok raspon procesa koji se mogu klasificirati kao slobodno kovanje. U nastavku će ukratko biti opisani najvažniji procesi kovanja prema [2].

3.1.1. Sabijanje

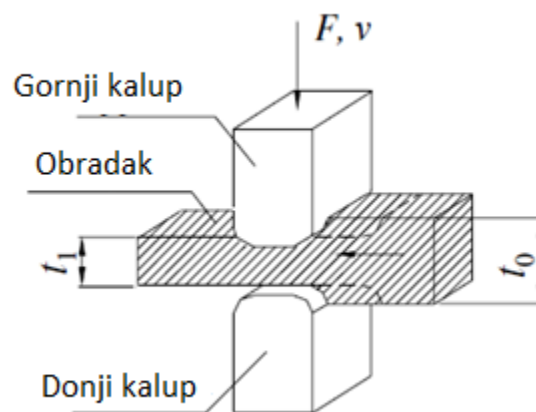
Sabijanje je otvoreni postupak kovanja pri kojem je duguljasti otkivak postavljen na fiksnoj ploči tj. matrici u okomitom položaju, a gornja površina otkivka je pritisnuta pokretnom matricom. Prilikom kretanja gornje matrice prema dolje smanjuje se visina otkivka, a povećava njegov poprečni presjek. Sabijanje se obično postiže ravnim matricama, kao što je prikazano na slici 5. Ravnne matrice su veće od poprečnog presjeka otkivka. Zbog prisutnosti trenja između otkivka i matrice materijal se suočava s ograničenjem bočnog širenja na gornjoj i donjoj površini, što rezultira bačvastim oblikom [9].



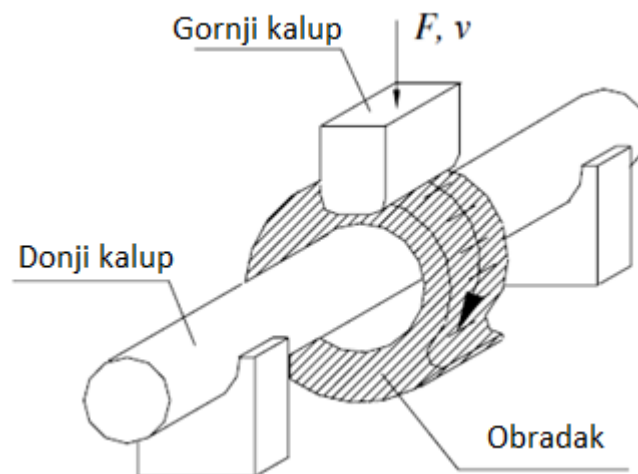
Slika 5. Slobodno kovanje i kovanje u ukovnjima [10]

3.1.2. Iskivanje i raskivanje

Iskivanje i raskivanje su postupci gdje se smanjuje veličina poprečnog presjeka sirovca pomoću uskih matrica. Kod iskivanja materijal se istovremeno širi i produžuje, dok se smanjuje presjek, postupak je prikazan na slici 6. Raskivanje je postupak gdje se prstenastom materijalu povećava promjer uz znatno smanjenje debljine stijenke, postupak je prikazan na slici 7. Postupci mijenjaju zrnatu strukturu materijala i učvršćuju unutarnje nedostatke materijala kao što su poroznost i pukotine [9].



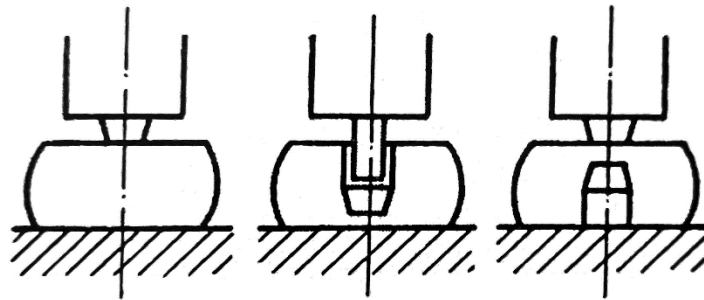
Slika 6. Postupak iskivanja [9]



Slika 7. Postupak raskivanja [9]

3.1.3. Probijanje

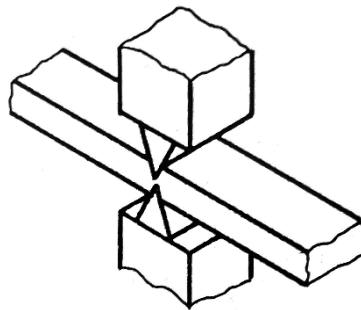
Probijanje otvora u otkovku je postupak oblikovanja i razdvajanja slobodnim kovanjem. Obično se probijanje vrši nakon sabijanja kao neophodna faza izrade prstena ili cjevastih otkovaka. Postupak je prikazan na slici 8 [2].



Slika 8. Postupak probijanja [2]

3.1.4. Zasijecanje

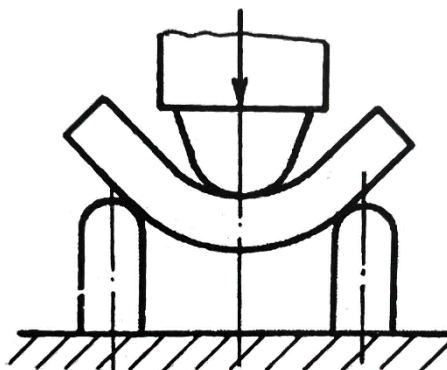
Zasijecanje je jedna od operacija slobodnog kovanja, redovito je predoperacija iskivanja. Postupak je prikazan na slici 9 [2].



Slika 9. Postupak zasijecanja [2]

3.1.5. Savijanje

Savijanje je postupak koji omogućava postizanje željene zakrivljenosti otkivka uz minimalnu promjenu poprečnog presjeka. Koristi se posebno oblikovani alat za određeni polumjer zakrivljenosti. Na vanjskom dijelu savijenog otkivka uzrokuje vlačna naprezanja, a na unutarnjem tlačna naprezanja. Postupak je prikazan na slici 10 [2].



Slika 10. Postupak savijanja [2]

3.2. Kovanje u ukovnjima

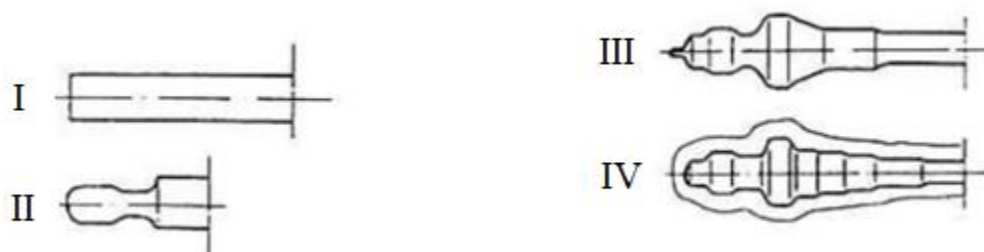
Kovanje u ukovnjima je postupak gdje se koristi niz oblikovanih kalupa za oblikovanje sirovca, koji ima relativno jednostavnu geometriju, u složeniji gotovi oblik otkovka. Ovaj se postupak obično provodi na odgovarajućoj povišenoj temperaturi radi poboljšanja plastičnog tečenja materijala i smanjenja potrebne sile kovanja [9].

Ovim postupkom kovanja mogu se proizvesti otkivci visoke kvalitete uz umjerene troškove u masovnoj i serijskoj proizvodnji. Otkovak ima visok omjer čvrstoće i mase, žilavost te otpornost na udarce i zamor. Budući da je protok metala ograničen konturama ukovnja, ovaj postupak može dati složenije oblike i manje tolerancije od postupka slobodnog kovanja [9].

Kovanjem čelika, aluminija, titana i drugih legura pomoću ukovnja može se proizvesti neograničena raznolikost oblika otkivka koji se kreću od nekoliko grama do više od 25 tona [9].

Pri kovanju u ukovnjima razlikuju se [2]:

- Pripremno kovanje – provodi se u pripremnim kovačkim gravurama, osnovna svrha je preraspodjela masa.
- Završno kovanje – stvaranje vijenca.



Slika 11. Postupno oblikovanje osovine različitih poprečnih presjeka [2]

Jednostavniji oblici mogu se oblikovati u jednoj operaciji, ali to su rijetki slučajevi. Najčešće se oblikuju složeniji oblici do kojih se dolazi postupno. Postupno oblikovanje osovine prikazano je na slici 11. Od sirovca do završnog otkivka dolazi se u jednoj ili više operacija pripremnog kovanja. Ovim postupkom preraspodjeljuje se masa sirovca i oblik se malo po malo približava završnom, koji se naposljetku dobiva u gravuri koja na rubu sadržava kanal za vijenac. Pripremne operacije izvode se u ukovnju u kojem su sve gravure, uključujući i završnu, izvedene u istom kalupu, što omogućava obavljanje cijelog postupka u jednom grijanju a time i brži rad. U posljednjoj operaciji otkivak poprima konačan oblik. Konačni volumen malo je manji od početnog volumena sirovca jer višak materijala tijekom kovanja istječe u posebno

profilirani profil u ukovnju, tzv. kanal za vijenac i po opsegu otkovka oblikuje vijenac. Taj višak materijala odstranjuje se posebnom kovačkom operacijom odsijecanje [2].

3.3. Kovački strojevi

Konstantni razvoj tehnologije kovanja zahtijeva dobro i temeljno razumijevanje mogućnosti i karakteristike opreme. Oprema za kovanje tj. preše i batovi za kovanje, utječu na proces kovanja, s obzirom na to da utječu na brzinu deformacije i temperaturne uvjete te određuju brzinu proizvodnje. Zahtjevi danog procesa kovanja moraju biti kompatibilni s karakteristikama opterećenja, energije, vremena i točnosti danog stroja za kovanje [1].

Prema [2] osnovne značajke strojeva su:

- energetske i kinematske:
 - nazivna snaga,
 - korisni rad:
 - u trajnom pogonu,
 - jednog udarca,
 - broj udaraca (hodova),
 - broj okretaja,
 - brzina alata,
 - snaga:
 - motora,
 - trenutačna,
 - moment (kod valjaka),
- geometrijske:
 - put žiga:
 - radni put (u kojem djeluje deformacijska sila),
 - put u području nazivne sile,
 - dimenzije za smještaj alata.

Kovački strojevi se mogu podijeliti u 3 skupine [2]:

- a) batovi,
- b) preše,
- c) horizontalni kovački strojevi.

Navedena podjela prema brzini alata nije baš najbolja, zbog toga što i korištenjem preša koje imaju malu brzinu mogu se postići velike brzine deformacije prilikom kovanja obradaka malih

dimenzija. Ujedno se brzine alata današnjih preša približavaju brzinama alata kod batova. Stoga je ispravno dijeliti kovačke strojeve prema njihovim performansama [2]:

- strojevi sa garantiranom silom deformiranja,
- strojevi sa garantiranim hodom alata,
- strojevi sa garantiranim radom odnosno energijom deformacije.

3.3.1. Batovi

Bat je najjeftiniji i najsvestraniji tip opreme za stvaranje opterećenja i energije potrebne za izvođenje procesa oblikovanja. Karakteriziraju ga višestruki udarci između oblikovanih matrica. Potrebnu energiju za kovanje dobivaju masom i brzinom slobodno padajućeg malja i pričvršćene gornje matrice ili ubrzanjem malja stlačenim zrakom. Primarno se koriste za toplo kovanje i u ograničenoj mjeri za oblikovanje limova koji se proizvode u malim količinama, na primjer u zrakoplovnoj industriji, izrada zrakoplovnih okvira. Rade puno brže od hidrauličnih preša, a rezultirajuće kratko vrijeme kovanja smanjuje hlađenje vrućeg otkivka. Kovanje batom ima reputaciju izvrsnog načina za poboljšanje metalurških svojstava mnogih materijala, uključujući materijale visokih performansi kao što je Waspaloy, superlegura na bazi nikla koja se koristi za diskove zrakoplovnih turbina. Budući da je bat energetski ograničen stroj za dovršetak kovanja u jednom udarcu, obično se nekoliko udaraca izvodi u istom ukovnju. Tijekom radnog hoda stroja, deformacija se nastavlja sve dok se ukupna kinetička energija ne rasprši plastičnom deformacijom materijala i elastičnom deformacijom malja i nakovnja kada se gornji i donji dio ukovnja međusobno dodiruju [1], [9].

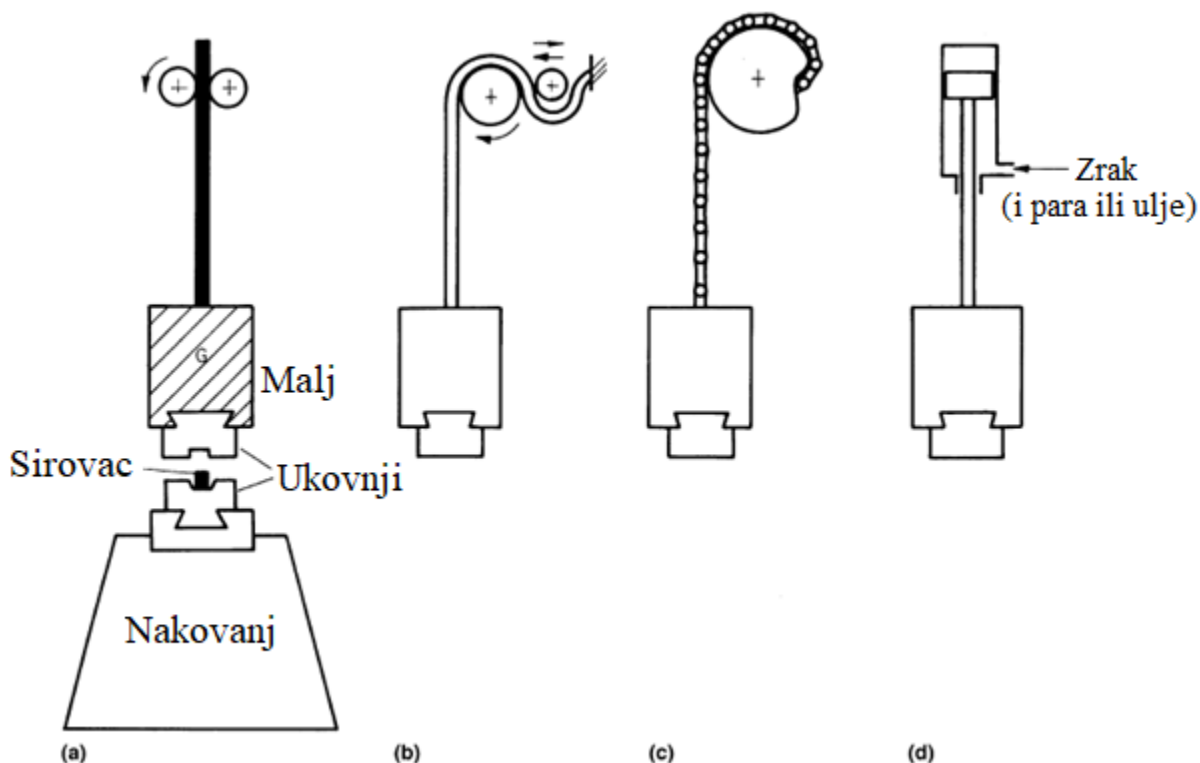
Ovisno o pogonu malja, batovi mogu biti [1]:

- mehanički batovi,
- pneumatski (zračni) batovi,
- protuudarni batovi.

3.3.1.1. Mehanički batovi

Mehanički batovi ili gravitacijski batovi su vrsta batova koji dobivaju energiju za kovanje iz mase i brzine slobodno padajućeg malja i pričvršćenog gornjeg ukovnja. Postoje razne izvedbe mehaničkih gravitacijskih batova, bat sa daskom, bat sa trakom ili remenom, bat sa lancem, bat sa klipom. Navedene izvedbe prikazane su na slici 12. Kod batova sa daskom, trakom, remenom ili lancem malj se podiže na radnu visinu pomoću tarnih valjaka potežući dasku, traku, remen ili lanac pogonskim valjkom. Dok se malj kod izvedbe bata sa klipom podiže klipnjačom uz

pomoć zraka ili pare. Sila udarca određena je visinom pada i masom malja. Mase malja kreću se od 180 do 4500 kg. Radna brzina gravitacijskih batova kreće se između 3,6 i 4,8 m/s [9].



Slika 12. Izvedbe mehaničkih gravitacijskih batova: a) bat sa daskom, b) bat sa remenom, c) bat sa lancem, d) bat sa klipom [1]

3.3.2. Preše

Preše su druga skupina strojeva koje se koriste za kovanje. Razlika između kovanja batom i kovanja prešom je u tome što prilikom kovanja batom na matricu se primjenjuje udarna sila, dok se kod kovanja prešom na matricu primjenjuje postupno rastući pritisak odnosno sila [11].

Preše za kovanje mogu se podijeliti na [2]:

- hidraulične preše,
- vretenaste preše,
- koljenaste preše.

3.3.2.1. Hidraulične preše

Izvedba hidraulične preše prikazana je na slici 13. Hidraulične preše rade na principu pritiska tekućine u cilindru i općenito su sporije, masivnije i skuplje za rad, ali su mnogo fleksibilnije i mogu imati veći kapacitet. Pošto se gibanje vrši protokom tekućine pod tlakom hidraulične preše se mogu programirati tako da imaju različite hodove rada za različite operacije, pa čak i

različite brzine unutar hoda. Brzina i sila kovanja mogu se izuzetno dobro kontrolirati u hidrauličnim prešama. Vrlo često se koriste mikroprocesori ili računalo za reguliranje parametara kao što su brzina i položaji malja. Ako je potrebno, preša se može regulirati da ostane na dnu radnog hoda unaprijed određeno vrijeme. Brzine preša kreću se od 0,03 do 0,3 m/s, masa može varirati između 12 i 82 tone [2], [12].

Hidraulične preše, kojima upravljaju klipovi unutar cilindara koje pokreću hidraulični ili hidraulično pneumatski sustavi, koriste se za pomicanje klipa u određenom slijedu. Cilindri su smješteni u različite vrste okvira. Povećavanjem broja cilindara podiže se raspoloživa sila preše. Sporije su u usporedbi s vretenastim i koljenastim prešama, dok u odnosu na bat mogu biti sporije i do 100 puta. Prilikom kovanja hidraulični pritisak se primjenjuje na vrh klipa, pomičući malj prema dolje. Nakon završetka kovanja tj. završetka radnog hoda hidraulični pritisak primjenjuje se na suprotnu stranu klipa podižući malj prema gore [9], [2].

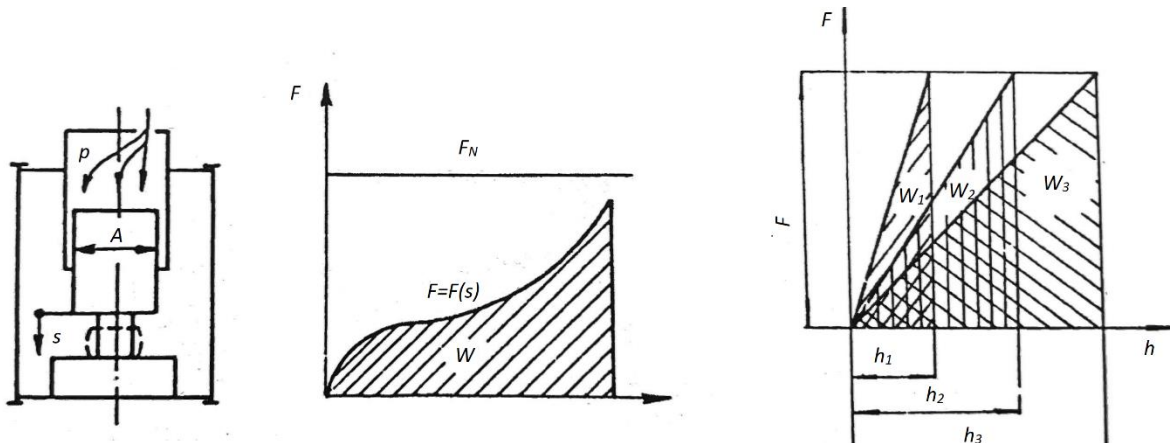
Koriste se za izvođenje svih vrsta kovanja, slobodno kovanje ili kovanje u ukovnjima. Najčešće se koriste za velike ili kompleksne otkivke. U odnosu na kovanje batom otkivci imaju veću dimenzijsku točnost te se često mogu dovršiti jednim zatvaranjem matrice za razliku od višestrukih udaraca maljem [2], [12].



Slika 13. Hidraulična preša [13]

3.4. Strojevi sa garantiranom silom deformiranja

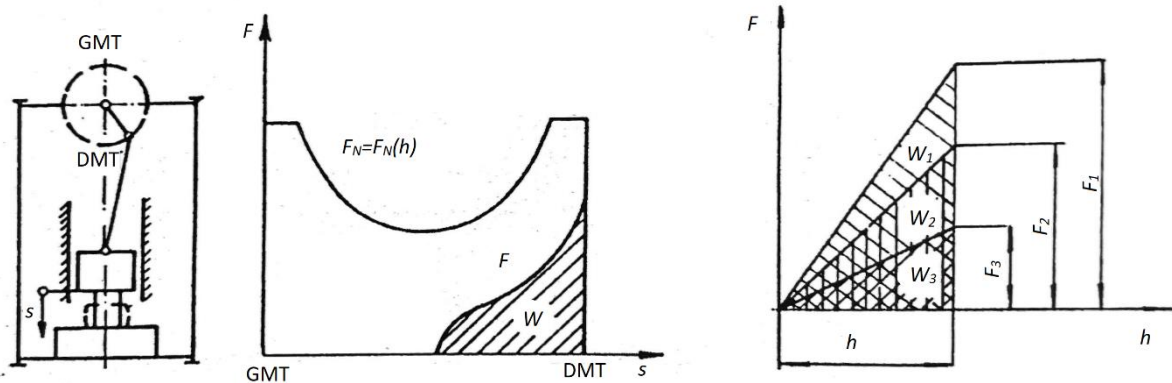
Slika 14 prikazuje strojeve sa ograničenom raspoloživom silom, prilikom dostizanja maksimalne sile preše, žig tj. alat se zaustavlja, te nije moguća daljnja deformacija [2].



Slika 14. Strojevi sa garantiranom silom deformiranja [2]

3.5. Strojevi sa garantiranim hodom alata

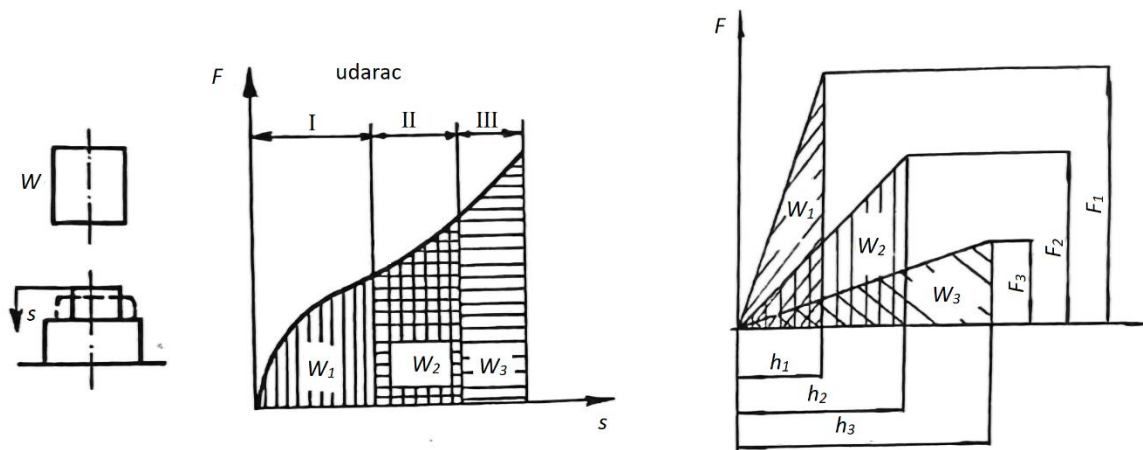
U ovu skupinu spadaju strojevi kod kojih je moguće regulirati hod alata, ali je taj hod ograničen. Na slici 15 može se vidjeti kako je hod alata ograničen dok su sila i rad varijabilne [2].



Slika 15. Strojevi sa garantiranim hodom alata [2]

3.6. Strojevi sa garantiranim radom deformacije

U ovoj skupini nalaze se strojevi kod kojih je rad tj. energija deformacije ograničena, dok su preostale dvije veličine, sila i hod alata varijabilne, što je prikazano na slici 16 [2].



Slika 16. Strojevi sa garantiranim radom odnosno energijom deformacije [2]

Preko F , h dijagrama na slikama 14, 15 ili 16 može se izračunati rad prema izrazu:

$$W = \frac{F * h}{2} \quad (6)$$

Gdje je:

- W – energija (rad) deformiranja, J
- F – sila, N
- h – hod alata, mm

4. METODE SNIMANJA KRIVULJA PLASTIČNOG TEČENJA

Metode snimanja plastičnog tečenja su vrlo brojne [2]:

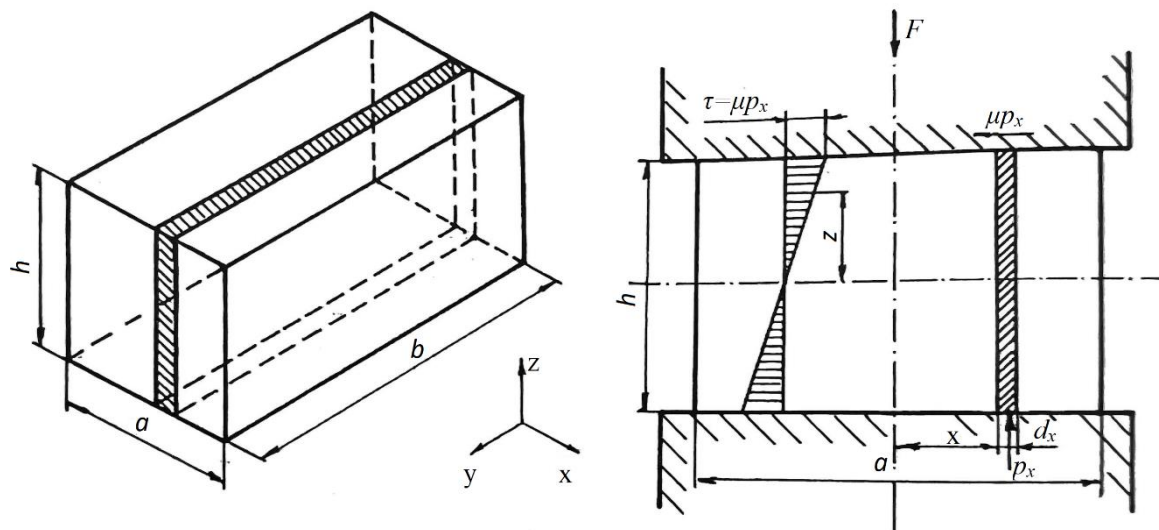
- sabijanjem cilindričnih uzoraka,
- utiskivanjem žigova ravnim tlačnim plohamama,
- metoda vlačnim testom,
- torzijskim testom na plastomeru,
- hidrauličnim udubljenjem lima.

U nastavku će biti prikazane neke od metoda snimanja plastičnog tečenja u postupku sabijanja materijala.

4.1. Metoda prema H. Lippmannu

H. Lippmann je upotrijebio tzv. metodu elementarnog volumena. Odnosi se na postupak sabijanja deformabilnog tijela. Korištenjem navedene metode nema više jednolikog rasporeda specifičnog pritiska na tlačnim površinama prizme. Da bi se metoda mogla promatrati ravninski i koristiti uvjet plastičnog tečenja u obliku primjenjivom za inženjerski pristup, pretpostavljeno je da je prizma prikazana na slici 17 opterećena vertikalnom silom dovoljno duga kako bi se deformacije u smjeru stranice b mogle zanemariti i promatrati samo promjene u preostala dva smjera. Ostale pretpostavke kako bi se moglo doći do odgovarajućeg izraza [2]:

- Problem se promatra u sistemu glavnih osi, dakle postoje samo glavna naprezanja, dok se smična naprezanja zanemaruju.
- Imajući u vidu ravninski slučaj deformacije smatra se da vrijedi uvjet plastičnog tečenja, $\sigma_1 - \sigma_3 = k_f$.
- Faktor kontaktnog trenja je konstantan.
- Smatra se da se tangencijalno smično naprezanje mijenja linearno od sredine prizme prema kontaktnim plohamama prizme.

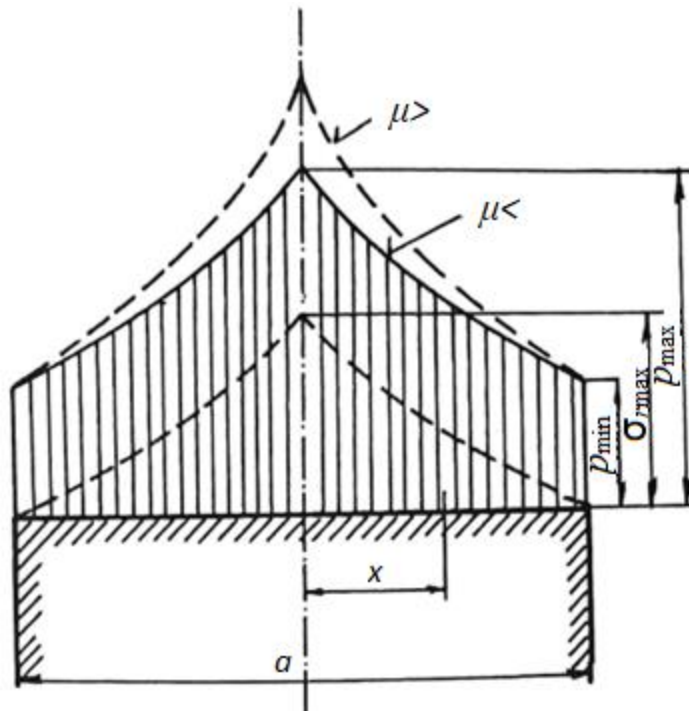


Slika 17. Paralelepiped i elementarni volumen sa napreznjima [2]

S već navedenim pretpostavkama, izvođenjem jednadžbi preko postojećih napreznja na tlačnim površinama prizme, potrebne sile sabijanja i uvjeta plastičnog tečenja dolazi se do izraza zakonitosti raspodjele specifičnog pritiska na čelu tlačene prizme [2].

$$p_x = k_f \cdot e^{\frac{2\mu}{h}(\frac{a}{2}-x)} \quad (7)$$

Izraz (7) grafički je prikazan na slici 17. Na slici je vidljivo kako je specifični pritisak nejednoliko raspoređen i da mu je maksimalna vrijednost u sredini, odnosno simetrali prizme. Prikazani raspored specifičnog napreznja potvrđen je eksperimentima, u blizini simetrala najčešće se pojavljuju oštećenja alata jer je na tim mjestima maksimalan pritisak. Pošto i radijalno napreznje postiže maksimum u sredini, prilikom sabijanja potrebno je redovito podmazivanje s ciljem smanjenja pritiska, a time i radijalnog napreznja koje oštećuje alat [2]. Ujedno je prikazano kako se pritisak i radijalno napreznje ponaša u ovisnosti o faktoru kontaktnog trenja. U idealnom slučaju kada bi faktor trenja bio tako malen da bi se mogao zanemariti i izjednačiti s nulom, vrijednost specifičnog pritiska bila bi ista na svim mjestima prizme i jednaka napreznju plastičnog tečenja [2].



Slika 18. Raspored specifičnog pritiska na tlačnoj površini pravokutne prizme [2]

Nakon izračunavanja vrijednosti specifičnog pritiska moguće je odrediti potrebnu silu sabijanja za deformaciju. Konačni izraz za silu sabijanja prizme [2]:

$$F = \frac{bh}{\mu} k_f \left(e^{\frac{\mu a}{h}} - 1 \right) \quad (8)$$

Ukoliko je potrebno računati silu sabijanja cilindričnog uzorka, sila se računa kao:

$$F = \frac{d_0 \cdot h_0}{\mu} \cdot k_f \cdot \left(e^{\frac{\mu \cdot d_0}{h_0}} - 1 \right) \quad (9)$$

Gdje je:

- F – sila sabijanja, N
- d_0 – promjer cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm
- h_0 – visina cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm
- μ - faktor kontaktnog trenja, -
- k_f – naprezanje plastičnog tečenja, N/mm²

Naprezanje plastičnog tečenja iščitava se iz krivulje tečenja za određeni logaritamski stupanj deformacije koji se računa iz izraza:

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (10)$$

Gdje je:

- h_0 – visina cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm
- h_1 – visina cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm

4.2. Metoda prema S. Gubkinu

Gubkinova formula za određivanje naprezanja plastičnog tečenja pri sabijanju punih cilindričnih uzoraka glasi [14]:

$$k_f = \frac{F}{A_0} e^\varphi \quad (11)$$

Gdje je:

- k_f – naprezanje plastičnog tečenja, N/mm²
- F – sila sabijanja, N
- A_0 – početna površina poprečnog presjeka cilindričnog uzorka, mm²
- φ – logaritamski stupanj deformacije

Dok pripadajući logaritamski stupanj deformacije za navedenu metodu iznosi [14]:

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (12)$$

Gdje je:

- φ – logaritamski stupanj deformacije, -
- h_1 – visina cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm
- h_0 – visina cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm

4.3. Metoda prema K. Reicherteru

Prema K. Reicherteru sabijanje punog cilindričnog uzorka zbog određivanje naprezanja plastičnog tečenja može se obaviti uz djelovanje višeosnog naprezanja. Cilindrični uzorak se sabija do određenog stupnja deformacije pomoću dviju paralelnih ploča bez podmazivanja. Poslije sabijanja cilindričnog uzorka mjeri se polumjer izbočenja zbog nastupanja bačvanja. Naprezanje plastičnog tečenja prema K. Reicherteru ovisi o odnosu visine h (prije sabijanja) i promjera cilindričnog uzorka d (prije sabijanja) [15].

Za slučaj kada je $d/h < 1$ vrijedi [15]:

$$k_f = \frac{\frac{F}{A_{\max}}}{1 - \frac{r_{\max}}{4\varrho_a}} \quad (13)$$

Gdje je:

- k_f – naprezanje plastičnog tečenja, N/mm²
- F – sila sabijanja, N
- A_{\max} – najveća površina poprečnog presjeka cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm²
- r_{\max} – maksimalan polumjer cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm
- ϱ_a – polumjer zaobljenja plašta cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm

a ako je $d/h > 1$, vrijedi:

$$k_f = \frac{\frac{F}{A_{\max}}}{1 - \frac{r_{\max}}{4\varrho_a} + \frac{\mu(d_0 - h_0)}{3h_0}} \quad (14)$$

Gdje je:

- k_f – naprezanje plastičnog tečenja, N/mm²
- F – sila sabijanja, N
- A_{\max} – najveća površina poprečnog presjeka cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm²
- r_{\max} – maksimalan polumjer cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm
- ϱ_a – polumjer zaobljenja plašta cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm
- μ – faktor kontaktnog trenja, -
- d_0 – promjer cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm
- h_0 – visina cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm

Potrebni polumjer zaobljenja plašta cilindričnog uzorka nakon sabijanja (kontura bačvanja) izračunava se po izrazu:

$$\varrho_a = \frac{h_0^2}{8(r_{\max} - r_0)} \quad (15)$$

Gdje je:

- ϱ_a – polumjer zaobljenja plašta cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm

- r_{\max} – maksimalan polumjer cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm
- h_0 – visina cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm
- r_0 – polumjer cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm

Faktor kontaktnog trenja μ u izrazu (14) iznosi 0,3 za suho trenje [2]. Logaritamski stupanj deformacije za navedenu metodu izračunava se pomoću izraza [15]:

$$\varphi = \ln \frac{A_0}{A_{\max}} \quad (16)$$

Gdje je:

- φ – logaritamski stupanj deformacije, -
- A_0 – površina poprečnog presjeka cilindričnog uzorka prije sabijanja, mm²
- A_{\max} – najveća površina poprečnog presjeka cilindričnog uzorka nakon sabijanja, mm²

Iz (13) i (14) proizlazi da će utjecaj faktora kontaktnog trenja na tlačnu površinu, a time i na veličinu k_f , biti to manji , što je odnos dimenzija cilindričnog uzorka prije sabijanja h_0/d_0 veći. Ograničenje ovog odnosa cilindričnog uzorka je zbog mogućnosti izvijanja ili nagibanja uzorka prilikom sabijanja [15].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni dio ovog diplomskog rada obavljen je u prostorijama Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za oblikovanje deformiranjem.

Cilj ispitivanja je pronalazak potrebne sile za sabijanje cilindričnih uzoraka tri različite aluminijske legure. Kako bi se sile dobivene ispitivanjem mogle usporediti sa silama oblikovanja dobivenim putem najmanje dva analitička pristupa od kojih je jedan dobiven korištenjem maksimalnog naprezanja plastičnog tečenja, a drugi korištenjem srednjeg naprezanja plastičnog tečenja za različite iznose logaritamskog stupnja deformacije. Metode analitičkih proračuna potrebne sile i energije deformiranja prilikom sabijanja cilindričnih uzoraka korištenjem maksimalnog naprezanja plastičnog tečenja prikazane su u poglavlju 4. METODE SNIMANJA KRIVULJA PLASTIČNOG TEČENJA. Potrebna sila za sabijanje cilindričnih uzoraka preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja k_{fm} (izvedeno iz elementarne teorije plastičnosti) računa se koristeći izraze (3), (4) i (6) iz elementarne teorije plastičnosti.



Slika 19. Gravitacijski bat

Ispitivanja su se najprije vršila na gravitacijskom batu prikazanom na slici 19. te zatim na hidrauličnoj preši prikazanoj na slici 20. Dimenzije uzoraka su $\varnothing 16 \times 32$ mm, a materijali uzoraka su AlMg3, AlMgSi1 i AlCuBiPb. Ukupno je korišteno 30 cilindričnih uzoraka, 10 uzoraka pojedine legure. Po 5 uzoraka svake legure sabijalo se na gravitacijskom batu, zatim se 5 uzoraka svake legure sabijalo na hidrauličnoj preši.



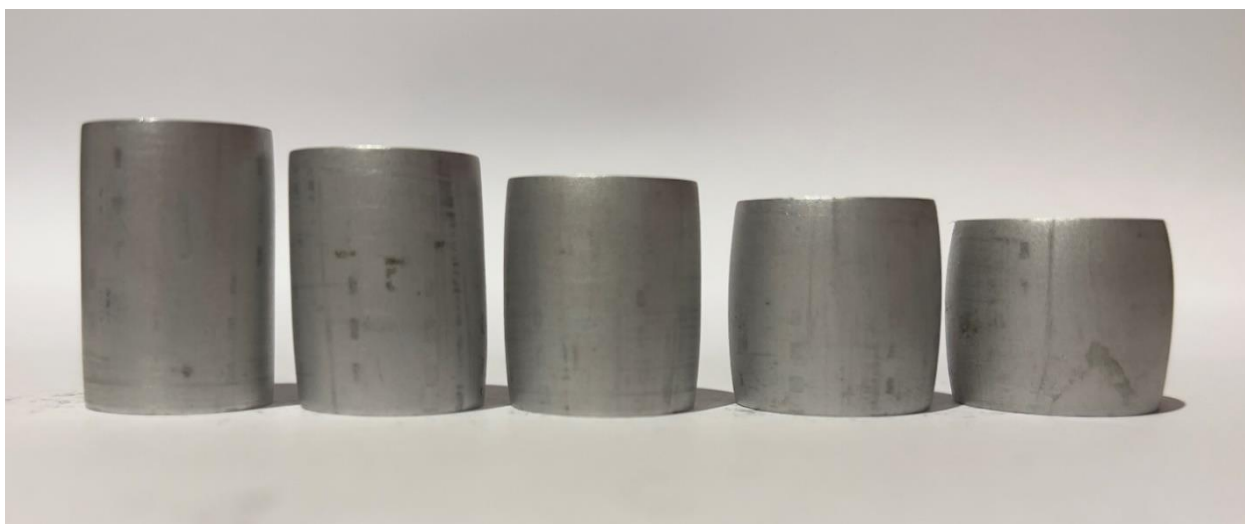
Slika 20. Hidraulična preša

5.1. Ispitivanje cilindričnih uzoraka na gravitacijskom batu

Ispitivanje se najprije vršilo na gravitacijskom batu gdje se za svaku aluminijsku leguru sabijalo 5 cilindričnih uzoraka sa različitim visina bata. Nakon svakog sabijanja izmjerila se visina i maksimalni promjer cilindričnih uzoraka pomoću pomičnog mjerila. Masa malja iznosi 84 kg. Korištene sile te energija (rad) deformiranja u eksperimentalnom dijelu prilikom sabijanja cilindričnih uzoraka izračunat će se u nastavku. Ujedno će se analitički prikazati potrebne sile i energije deformiranja prilikom sabijanja cilindričnih uzoraka prema metodama navedenim u poglavlju 4. METODE SNIMANJA KRIVULJA PLASTIČNOG TEČENJA.

5.1.1. Sabijanje uzoraka legure AlMg3

Uzorci su sabijeni počevši od visine podizanja malja 0,4 m sve do 1,2 m, povećavajući visinu za 0,2 m prilikom svakog mjerenja. Sabijeni uzorci prikazani su na slici 21, vidljivo je kako dolazi do sve većeg sabijanja te bačvanja povećavajući visinu s koje pada malj. Izmjerene vrijednosti visine te maksimalni promjeri uzoraka nakon sabijanja prikazani su u tablici 1.



Slika 21. Cilindrični uzorci nakon sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMg3

Tablica 1. Konačna visina uzoraka ovisno o visini podizanja malja, legura AlMg3

Uzorak	Visina podizanja malja H , m	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Maksimalni promjer nakon sabijanja d_{max} , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm
1	0,4	32	16	17,75	26,23
2	0,6	32	16	18,7	24,02
3	0,8	32	16	19,6	21,99
4	1	32	16	20,65	20,22
5	1,2	32	16	21,6	18,54

Utrošena energija (rad) deformacije i sila sabijanja uzoraka batom izračunata su u daljnjem tekstu za svaki uzorak.

Uzorak 1

Logaritamski stupanj deformacije prema (3):

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{32}{26,23} = 0,199$$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja za φ iz krivulje tečenja u prilogu (II):

$$k_f = 237,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Energija deformiranja:

$$W = G \cdot H = m \cdot g \cdot H = 84 \cdot 9,81 \cdot 0,4 = 329,62 \text{ J}$$

Specifični rad deformacije prema (4):

$$w = \frac{W}{V_0} = \frac{W}{\frac{h_0 \cdot d_0^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{329,62 \cdot 1000}{\frac{32 \cdot 16^2 \cdot \pi}{4}} = 51,26 \frac{\text{mJ}}{\text{mm}^3}$$

Srednje naprezanje plastičnog tečenja prema (4):

$$k_{fm} = \frac{w}{\varphi} = \frac{51,26}{0,199} = 257,79 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Sila sabijanja iz izraza (6):

$$F = \frac{2 \cdot W}{h_0 - h_1} = \frac{2 \cdot 329,62}{32 - 26,26} = 114,25 \text{ N}$$

Slijedeći izračun iznad za uzorak 1 provedeni su izračuni za preostalih četiri uzorka te su dobiveni podatci prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Izračunate vrijednosti sabijanja na batu, legura AlMg3

Uzorak	Visina podizanja malja H , m	Logaritamski stupanj deformacije φ	Naprezanje plastičnog tečenja k_f , N/mm^2	Energija deformiranja W , J	Srednje naprezanje plastičnog tečenja k_{fm} , N/mm^2	Sila sabijanja F , kN
1	0,4	0,199	237,5	329,62	257,79	114,25
2	0,6	0,287	247,5	494,42	268,03	123,92
3	0,8	0,375	260	659,23	273,26	131,71
4	1	0,459	270	824,04	279,14	139,90
5	1,2	0,546	280	988,85	281,73	146,93

Nakon izračuna eksperimentalno utrošene energije te sile deformiranja, provest će se i analitički izračun potrebne energije deformiranja i sile sabijanja.

Potrebna sila za sabijanje cilindričnih uzoraka prema 4.1. Metoda prema H. Lippmannu.

Logaritamski stupanj deformacije prema izrazu (10):

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{32}{26,23} = 0,199$$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja za φ iz krivulje tečenja u prilogu (II):

$$k_f = 237,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Potrebna sila za sabijanje cilindričnog uzorka prema izrazu (9):

$$F = \frac{d_0 \cdot h_0}{\mu} \cdot k_f \cdot \left(e^{\frac{\mu \cdot d_0}{h_0}} - 1 \right) = \frac{16 \cdot 32}{0,3} \cdot 237,5 \cdot \left(e^{\frac{0,3 \cdot 16}{32}} - 1 \right) = 65,6 \text{ kN}$$

Faktor kontaktnog trenja μ za sabijanje u hladnom stanju iznosi 0,3 [2].

Energija (rad) potrebna za deformiranje cilindričnog uzorka prema izrazu (6):

$$W = \frac{F \cdot (h_0 - h_1)}{2} = \frac{65,6 \cdot (32 - 26,23)}{2} = 189,25 \text{ J}$$

Potrebna sila za sabijanje cilindričnih uzoraka prema 4.2. Metoda prema S. Gubkinu.

Logaritamski stupanj deformacije prema izrazu (12):

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{26,23}{32} = -0,199$$

Potrebna sila za sabijanje cilindričnog uzorka prema izrazu (11):

$$F = \frac{k_f \cdot A_0}{e^\varphi} = \frac{k_f \cdot \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}}{e^\varphi} = \frac{237,5 \cdot \frac{16^2 \cdot \pi}{4}}{e^{-0,199}} = 58,27 \text{ kN}$$

Energija potrebna za deformiranje cilindričnog uzorka prema izrazu (6):

$$W = \frac{F \cdot (h_0 - h_1)}{2} = \frac{58,27 \cdot (32 - 26,23)}{2} = 168,11 \text{ J}$$

Potrebna sila za sabijanje cilindričnih uzoraka prema 4.3. Metoda prema K. Reicherteru.

Polumjer zaobljenja plašta cilindričnog uzorka nakon sabijanja q_a računa se prema izrazu (15):

$$q_a = \frac{h_0^2}{8(r_{\max} - r_0)} = \frac{h_0^2}{8\left(\frac{d_{\max}}{2} - \frac{d_0}{2}\right)} = \frac{32^2}{8\left(\frac{17,75}{2} - \frac{16}{2}\right)} = 146,29 \text{ mm}$$

Logaritamski stupanj deformacije prema izrazu (16):

$$\varphi = \ln \frac{A_0}{A_{\max}} = \ln \frac{\frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d_{\max}^2 \cdot \pi}{4}} = \ln \frac{\frac{16^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{17,75^2 \cdot \pi}{4}} = -0,206$$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja za φ iz krivulje tečenja u prilogu (II):

$$k_f = 237,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Potrebna sila za sabijanje cilindričnog uzorka iz izraza (13):

$$F = k_f \cdot A_{\max} \cdot \left(1 - \frac{r_{\max}}{4 \cdot \varrho_a}\right) = k_f \cdot \frac{d_{\max}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \left(1 - \frac{d_{\max}}{8 \cdot \varrho_a}\right) = k_f \cdot \frac{d_{\max}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \left(1 - \frac{d_{\max}}{8 \cdot \varrho_a}\right)$$

$$= 237,5 \cdot \frac{17,75^5 \cdot \pi}{4} \cdot \left(1 - \frac{17,75}{8 \cdot 146,29}\right) = 57,88 \text{ kN}$$

Energija (rad) potrebna za deformiranje cilindričnog uzorka prema izrazu (6):

$$W = \frac{F \cdot (h_0 - h_1)}{2} = \frac{57,88 \cdot (32 - 26,23)}{2} = 166,98 \text{ J}$$

Potrebna sila za sabijanje cilindričnih uzoraka preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja k_{fm} koristeći izraze (3) i (4) iz elementarne teorije plastičnosti.

Logaritamski stupanj deformacije prema izrazu (3):

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{32}{26,23} = 0,199$$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja za φ iz krivulje tečenja u prilogu (II):

$$k_{f1} = 237,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Srednje naprezanje plastičnog tečenja računa se sljedećim izrazom [2]:

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2}$$

Gdje je:

- k_{fm} – srednje naprezanje plastičnog tečenja, N/mm²
- k_{f0} – naprezanje plastičnog tečenja u početnom stanju, N/mm²
- k_{f1} – naprezanje plastičnog tečenja nakon sabijanja, N/mm²

Naprezanje plastičnog tečenja u početnom stanju k_{f0} odgovara granici elastičnosti $\sigma_E=185$ N/mm².

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} = \frac{185 + 237,5}{2} = 211,25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Potrebni rad za sabijanje cilindričnih uzoraka prema izrazu (4):

$$W = k_{fm} \cdot \varphi \cdot V_0 = k_{fm} \cdot \varphi \cdot \frac{d_0^2 \cdot \pi \cdot h_0}{4} = 211,25 \cdot 0,199 \cdot \frac{16^2 \cdot \pi \cdot 32}{4} = 270,25 \text{ J}$$

Potrebna sila za sabijanje cilindričnih uzoraka prema izrazu (6):

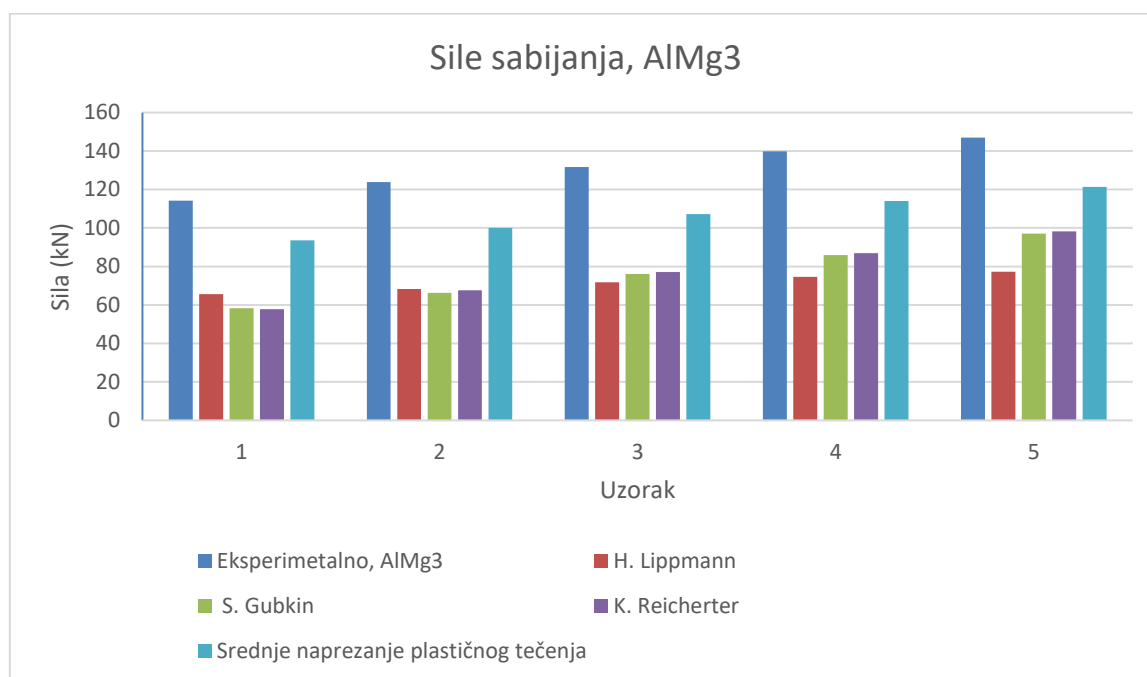
$$F = \frac{2 \cdot W}{h_0 - h_1} = \frac{2 \cdot 270,25}{32 - 26,23} = 93,67 \text{ kN}$$

Proračun sila i energija sabijanja za ostalih 4 uzoraka provodi se jednako kao i za uzorak 1 stoga će se preskočiti, dok su rezultati prikazani numerički u tablici 3, te grafički na slikama 22 i 23. Po prikazanim podacima analitički dobivene sile i energije preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) su najbliže vrijednostima sila i energija

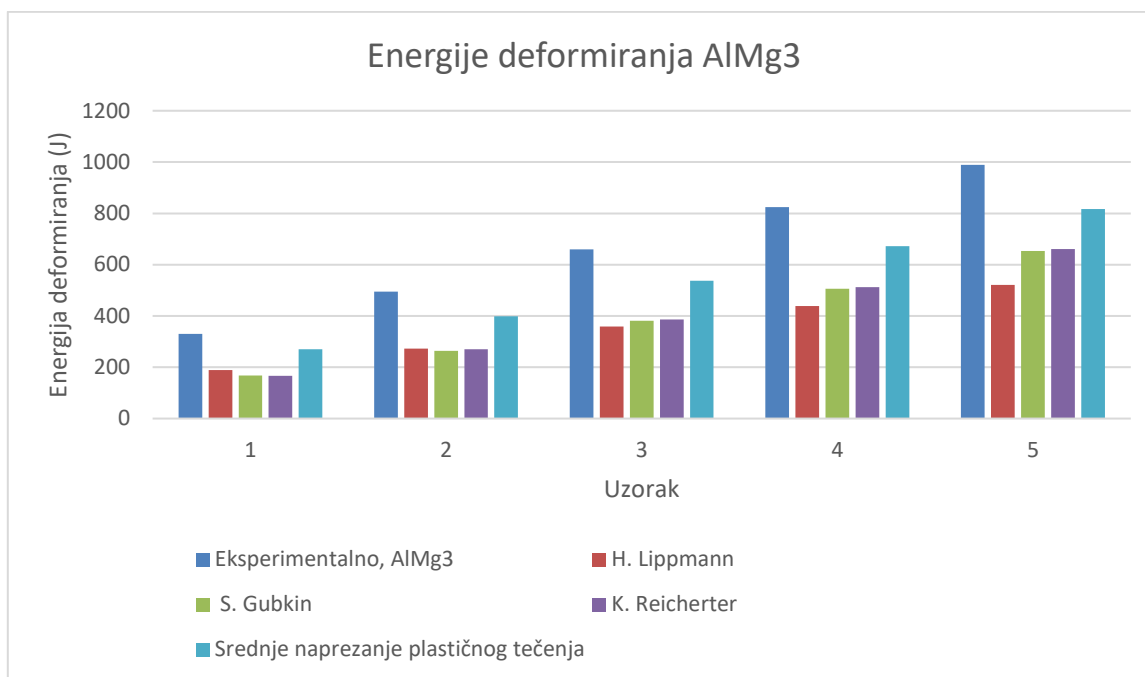
korištenih tijekom ispitivanja, dok su sile i energije dobivene analitičkim pristupom preko preostalih metoda znatno manje nego one kod ispitivanja.

Tablica 3. Sile sabijanja i energije deformiranja na batu, legura AlMg3

Uzorak	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J
	Eksperimentalno		H. Lippmann		S. Gubkin		K. Reicherter		Srednje naprezanje plastičnog tečenja	
1	114,25	329,62	65,60	189,25	58,26	168,07	57,88	166,98	93,67	270,25
2	123,92	494,42	68,36	272,75	66,30	264,52	67,64	269,88	100,03	399,11
3	131,71	659,23	71,81	359,42	76,07	380,74	77,20	386,39	107,30	537,05
4	139,90	824,04	74,57	439,24	85,91	506,03	86,98	512,34	114,08	671,95
5	146,93	988,85	77,34	520,47	97,17	653,95	98,27	661,33	121,32	816,47



Slika 22. Grafički prikaz sile sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMg3



Slika 23. Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMg3

5.1.2. Sabijanje uzoraka legure AlMgSi1

Uzorci su sabijeni počevši od visine podizanja malja 0,6 m sve do 1,4 m, povećavajući visinu za 0,2 m prilikom svakog mjerenja. Sabijeni uzorci prikazani su na slici 24, vidljivo je kako dolazi do sve većeg sabijanja te pojave bačvanja povećavajući visinu s koje pada malj. Izmjerene vrijednosti visine te maksimalni promjeri uzoraka nakon sabijanja prikazani su u tablici 5.



Slika 24. Cilindrični uzorci nakon sabijanja batom, legura AlMgSi1

Tablica 4. Konačna visina uzoraka ovisno o visini podizanja malja, legura AlMgSi1

Uzorak	Visina podizanja malja H , m	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Maksimalni promjer nakon sabijanja d_{max} , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm
1	0,6	32	16	17,65	26,81
2	0,8	32	16	18,25	25,41
3	1	32	16	18,8	23,85
4	1,2	32	16	19,4	22,35
5	1,4	32	16	20,3	21,1

Proračun eksperimentalno upotrijebljene sile sabijanja te energije (rada) deformiranja kao i analitički izračunate potrebne sile sabijanja te energija deformiranja prema već spomenutim metodama izvede se jednako kao i kod 5.1.1. Sabijanje uzoraka legure AlMg3, stoga je preskočen proračun te su rezultati prikazani numerički u tablici 5 i tablici 6, te grafički na slikama 25 i 26. Jedino se razlikuje krivulja iz koje se očitava naprezanje plastičnog tečenja, u ovom slučaju korištena je krivulja tečenja u prilogu (III).

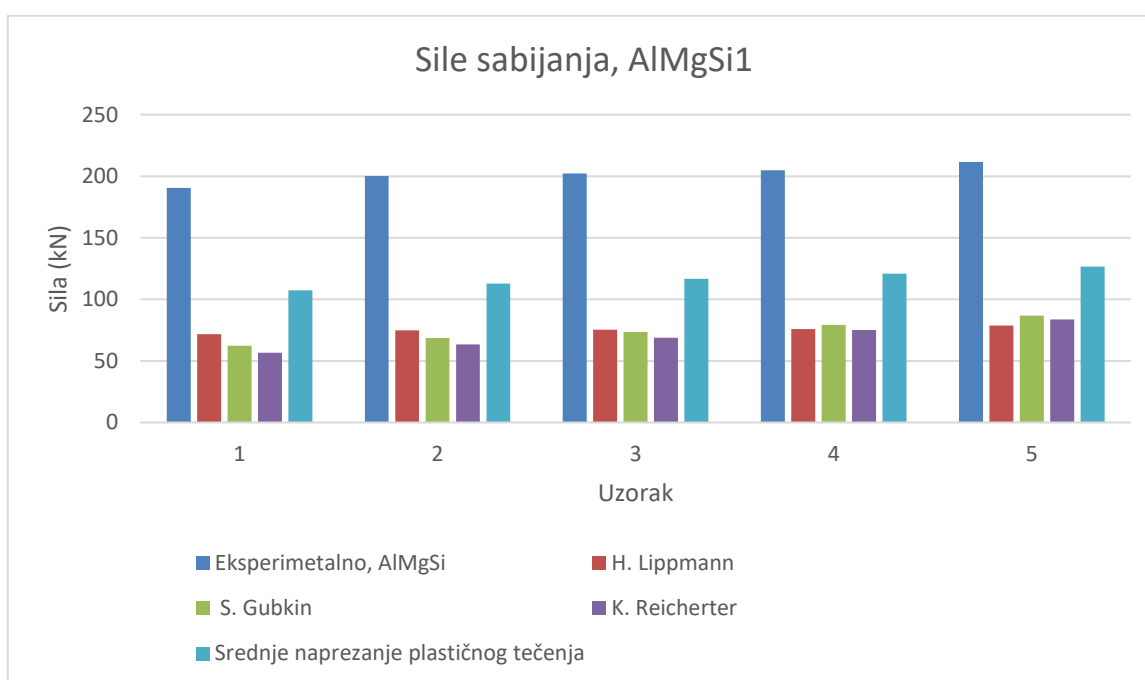
Tablica 5. Izračunate vrijednosti sabijanja na batu, legura AlMgSi1

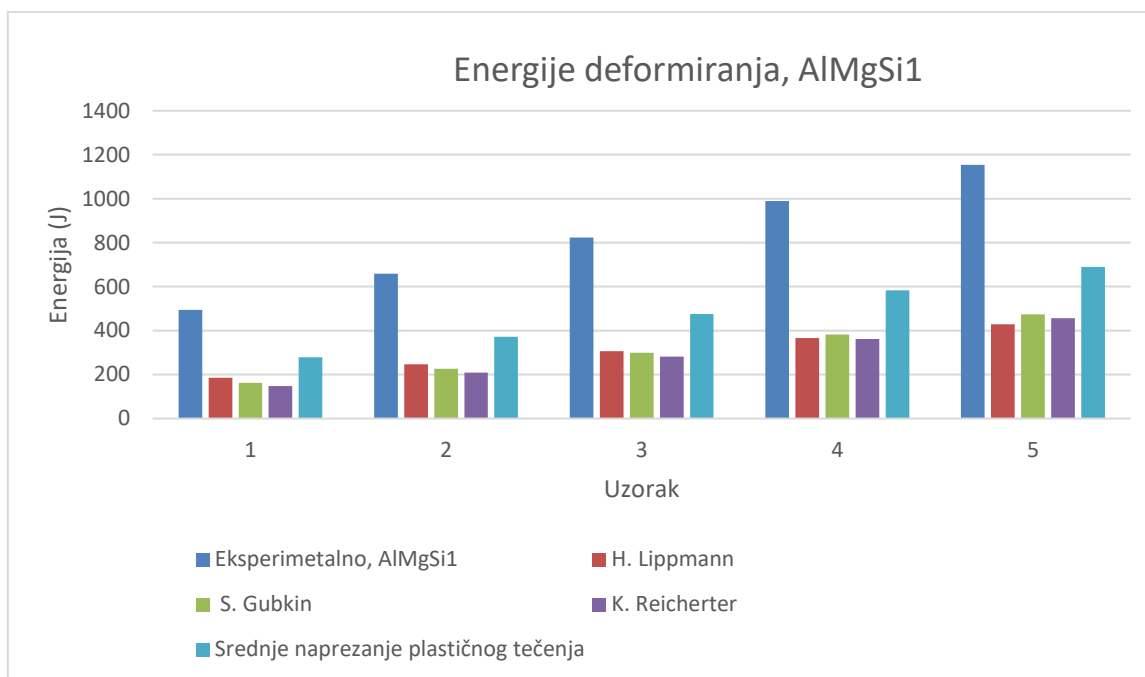
Uzorak	Visina podizanja malja H , m	Logaritamski stupanj deformacije φ	Naprezanje plastičnog tečenja k_f , N/mm ²	Energija deformiranja W , J	Srednje naprezanje plastičnog tečenja k_{fm} , N/mm ²	Sila sabijanja F , kN
1	0,6	0,177	270	494,42	434,25	190,53
2	0,8	0,231	271,25	659,23	444,34	200,07
3	1	0,294	272,5	824,04	435,70	202,22
4	1,2	0,359	271,25	988,85	428,22	204,94
5	1,4	0,416	270	1153,66	430,55	211,68

Po prikazanim podacima u tablici 6 te slikama 25 i 26 analitički dobivene sile i energije preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) su najbliže vrijednostima sila i energija korištenih tijekom ispitivanja, dok su sile i energije dobivene analitičkim pristupom preko preostalih metoda znatno manje nego one kod ispitivanja. U ovom slučaju analitički dobivene sile i energije preko svih metoda znatno više odstupaju od korištenih sila i energija tijekom ispitivanja u usporedbi sa legurom AlMg3.

Tablica 6. Sile sabijanja i energije deformiranja na batu, legura AlMgSi1

Uzorak	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J
	Eksperimentalno		H. Lippmann		S. Gubkin		K. Reicherter		Srednje naprezanje plastičnog tečenja	
1	190,53	494,42	71,81	186,35	62,40	161,92	56,68	147,08	107,49	278,95
2	200,07	659,23	74,92	246,86	68,68	226,31	63,44	209,05	112,85	371,84
3	202,22	824,04	75,26	306,70	73,51	299,56	68,97	281,04	116,61	475,18
4	204,94	988,85	75,95	366,48	79,17	381,97	75,09	362,33	120,85	583,08
5	211,68	1153,66	78,72	429,00	86,90	473,63	83,66	455,96	126,60	689,97

**Slika 25. Grafički prikaz sile sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMgSi1**



Slika 26. Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja gravitacijskim batom, legura AlMgSi1

5.1.3. Sabijanje uzoraka AlCuBiPb

Uzorci su sabijeni počevši od visine podizanja malja 0,8 m sve do 1,6 m, povećavajući visinu za 0,2 m prilikom svakog mjerenja. Sabijeni uzorci prikazani su na slici 27, vidljivo je kako dolazi do sve većeg sabijanja te pojave bačvanja povećavajući visinu s koje pada malj. Izmjerene vrijednosti visine te maksimalni promjeri uzoraka nakon sabijanja prikazani su u tablici 7.



Slika 27. Cilindrični uzorci nakon sabijanja batom, legura AlCuBiPb

Tablica 7. Konačna visina uzoraka ovisno o visini podizanja malja, legura AlCuBiPb

Uzorak	Visina podizanja malja H , m	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Maksimalni promjer nakon sabijanja d_{max} , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm
1	0,8	32	16	18,25	25,46
2	1	32	16	18,8	24,06
3	1,2	32	16	19,6	22,8
4	1,4	32	16	20,4	21,52
5	1,6	32	16	20,85	20,42

Proračun eksperimentalno upotrijebljene sile sabijanja te energije (rada) deformiranja izvode se jednako kao i kod 5.1.1., stoga je preskočen proračun, a rezultati su prikazani u tablici 8.

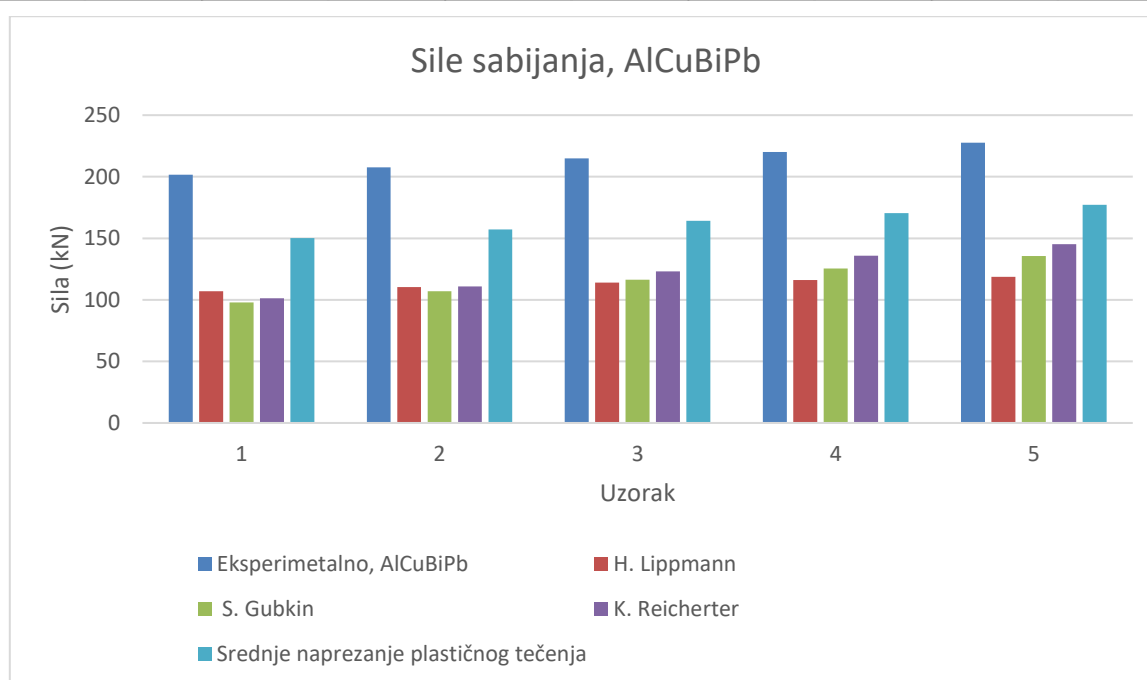
Tablica 8. Izračunate vrijednosti sabijanja na batu, legura AlCuBiPb

Uzorak	Visina podizanja malja H , m	Logaritamski stupanj deformacije φ	Naprezanje plastičnog tečenja k_f , N/mm^2	Energija deformiranja W , J	Srednje naprezanje plastičnog tečenja k_{fm} , N/mm^2	Sila sabijanja F , kN
1	0,8	0,229	387,5	659,23	448,16	201,60
2	1	0,285	400	824,04	449,10	207,57
3	1,2	0,339	412,5	988,85	453,40	214,97
4	1,4	0,397	420	1153,66	451,94	220,16
5	1,6	0,449	430	1318,46	456,17	227,71

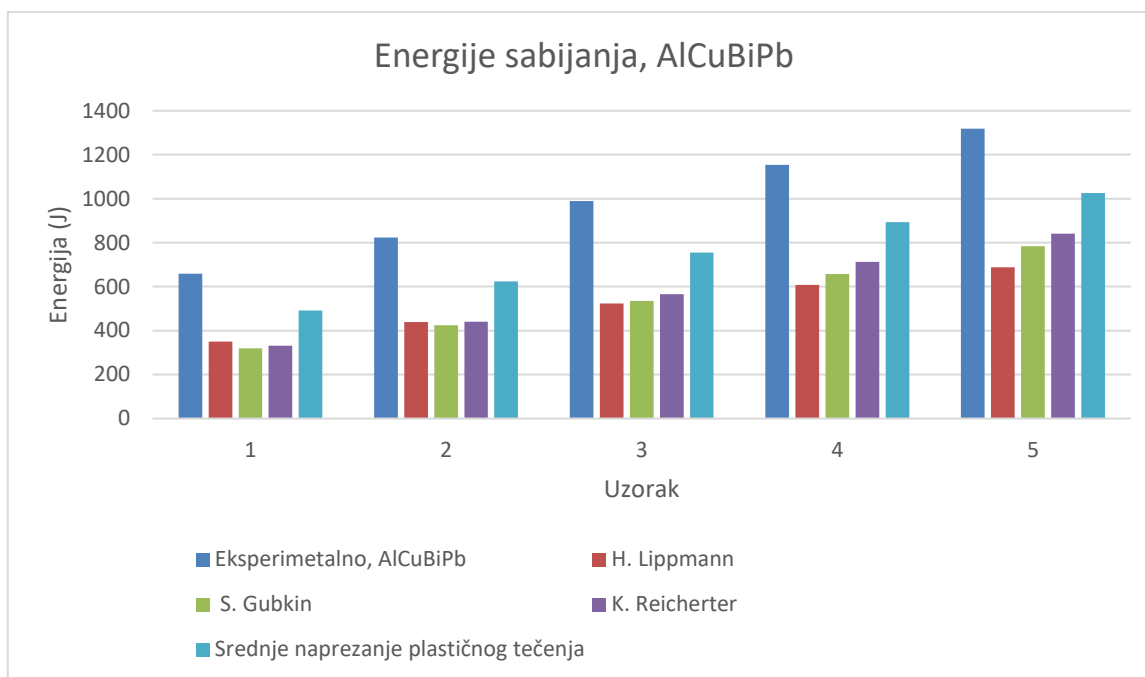
Proračun analitički potrebne sile sabijanja te energije deformiranja prema već spomenutim metodama izvode se jednako kao i kod 5.1.1., stoga je preskočen proračun te su rezultati prikazani numerički u tablici 9, te grafički na slikama 28 i 29. Jedino se razlikuje krivulja iz koje se očitava naprezanje plastičnog tečenja, u ovom slučaju korištena je krivulja tečenja u prilogu (IV). Po prikazanim podacima analitički dobivene sile i energije preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) su najbliže vrijednostima sila i energija korištenih tijekom ispitivanja, dok su sile i energije dobivene analitičkim pristupom preko preostalih metode znatno manje nego one kod eksperimentalnog ispitivanja.

Tablica 9. Sile sabijanja i energije deformiranja na batu, legura AlCuBiPb

Uzorak	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J
	Eksperimentalno		H. Lippmann		S. Gubkin		K. Reicherter		Srednje naprezanje plastičnog tečenja	
1	201,60	659,23	107,03	349,98	97,92	320,21	101,26	331,10	150,13	490,94
2	207,57	824,04	110,48	438,60	106,97	424,65	110,89	440,22	157,14	623,86
3	214,97	988,85	113,93	524,08	116,40	535,46	123,08	566,19	164,16	755,16
4	220,16	1153,66	116,00	607,85	125,57	657,99	135,95	712,37	170,50	893,45
5	227,71	1318,46	118,76	687,65	135,49	784,46	145,25	840,97	177,21	1026,05

**Slika 28. Grafički prikaz sile sabijanja gravitacijskim batom, legura AlCuBiPb**

Uspoređujući sve rezultate sabijanja gravitacijskim batom moglo bi se reći kako nijedna metoda srednjeg naprezanja plastičnog tečenja od analitičkih metoda nije pouzdana što se tiče izračuna potrebne sile sabijanja. Uspoređujući sile sabijanja na gravitacijskom batu za svaku leguru sa analitički dobivenim silama, sile dobivene preko metode srednjeg naprezanja plastičnog tečenja najbliže su eksperimentalnim silama, ali znatno manje, dok sile računajući preko ostalih metoda su još manje u odnosu na eksperimentalne sile.



Slika 29. Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja gravitacijskim batom, legura AlCuBiPb

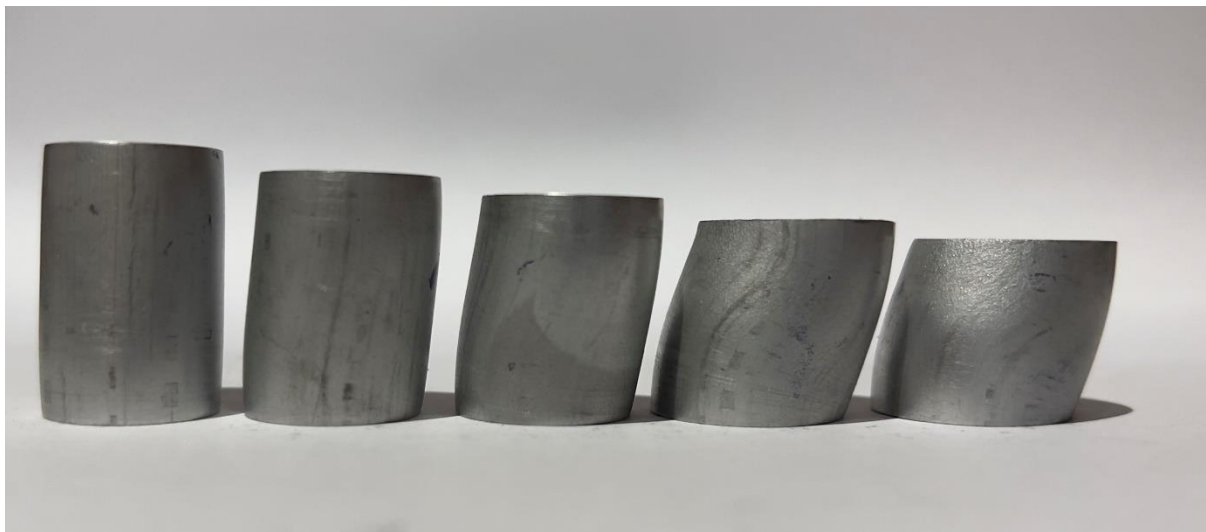
5.2. Ispitivanje cilindričnih uzoraka na hidrauličnoj preši

Nakon ispitivanja na gravitacijskom batu uslijedilo je ispitivanje na hidrauličnoj preši. Na hidrauličnoj preši, kao i kod ispitivanja na batu, sabijalo se 5 cilindričnih uzoraka pojedine legure. U ovom slučaju uzorci su se sabijali na identičnu visinu kao već sabijeni uzorci gravitacijskim batom. Pri svakom sabijanju pratio se pritisak preše na svaki uzorak te se preko tablice u prilogu (I) navedeni pritisak preračunao u silu sabijanja.

5.2.1. Sabijanje uzoraka legure AlMg3

Sabijeni uzorci prikazani su na slici 30. Vidljivo je kako povećanjem stupnja logaritamske deformacije dolazi do pojave bačvanja ali u ovom slučaju dolazi i do sve većeg nagibanja uzoraka. Mogući razlog tome je preveliki omjer početne visine uzoraka i početnog promjera, h/d .

Očitani pritisak preše tijekom sabijanja preračunat je u silu sabijanja pomoću tablice iz priloga (I). Sile sabijanja prikazane su u tablici 10.



Slika 30. Cilindrični uzorci nakon sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMg3

Tablica 10. Korištena sila za sabijanje uzoraka na određenu visinu, legura AlMg3

Uzorak	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm	Pritisak sabijanja p , Mpa	Sila sabijanja F , kN
1	32	16	26,23	2,45	84,55
2	32	16	24,02	3,14	108,53
3	32	16	21,99	2,94	101,26
4	32	16	20,22	3,14	108,53
5	32	16	18,54	3,92	135,91

Proračun za energiju sabijanja slijedi u nastavku teksta.

Uzorak 1

Logaritamski stupanj deformacije prema izrazu (3):

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{32}{26,23} = 0,199$$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja za φ iz krivulje tečenja u prilogu (I):

$$k_f = 237,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Energija (rad) deformiranja prema izrazu (6):

$$W = \frac{F \cdot (h_0 - h_1)}{2} = \frac{84,55 \cdot (32 - 26,23)}{2} = 243,93 \text{ J}$$

Po prethodnom izračunu za uzorak 1 provedeni su izračuni za preostalih četiri uzorka te su dobiveni podatci prikazani u tablici 11.

Tablica 11. Energija sabijanja cilindričnih uzoraka hidrauličnom prešom, legura AlMg3

Uzorak	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm	Pritisak sabijanja p , Mpa	Sila sabijanja F , kN	Energija sabijanja W , J
1	32	16	26,23	2,45	84,55	243,93
2	32	16	24,02	3,14	108,53	433,03
3	32	16	21,99	2,94	101,26	506,81
4	32	16	20,22	3,14	108,53	639,24
5	32	16	18,54	3,92	135,91	914,67

Kako se ispitivanje na hidrauličnoj preši vršilo na način da se uzorci sabijaju na visinu na koju su sabijeni uzorci ispitivani na gravitacijskom batu, potrebne sile i energije sabijanja prema 4.1. Metoda prema H. Lippmannu, 4.2. Metoda prema S. Gubkinu te preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) biti će jednake kao što je izračunato za ispitivanje batom u poglavlju 5.1.1. Tako da se neće ponovno provoditi izračun navedenih metoda već će rezultati biti samo prikazani tablično.

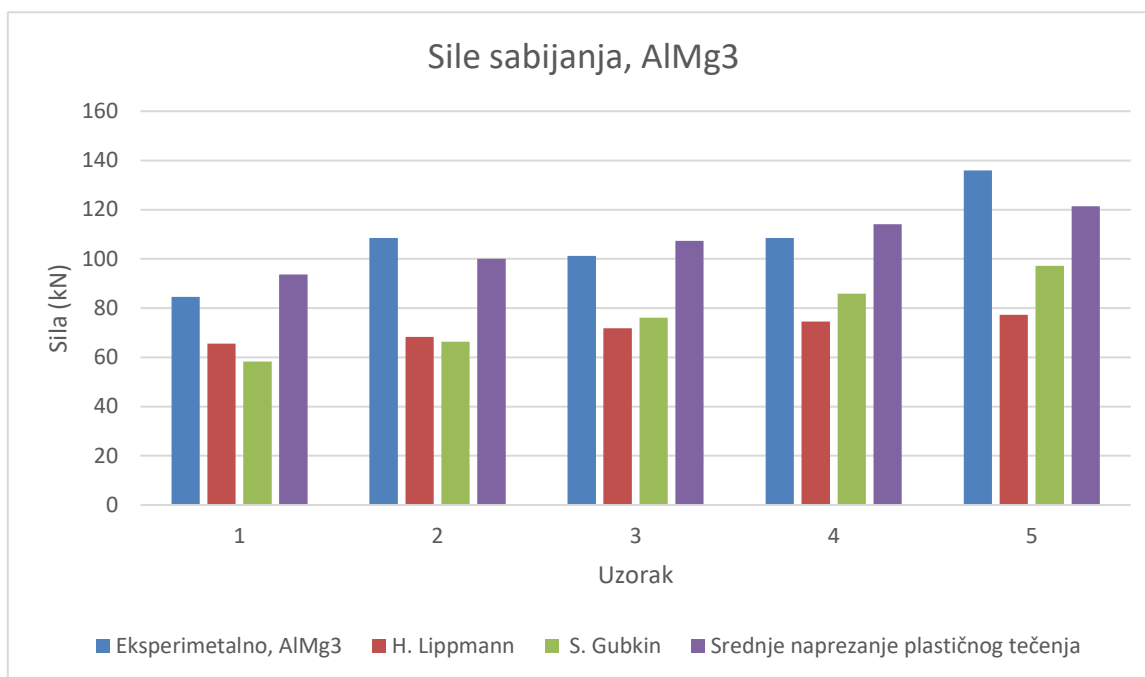
Potrebnu silu i energiju za sabijanje prema 4.3. Metoda prema K. Reicherteru nije moguće provesti zbog toga što prilikom sabijanja hidrauličnom prešom dolazi do nagibanja uzoraka što je već ranije navedeno kao nedostatak ove metode zbog ograničenja odnosa h/d uzoraka prije sabijanja.

Tablica 12. Sile sabijanja i energije deformiranja na preši, legura AlMg3

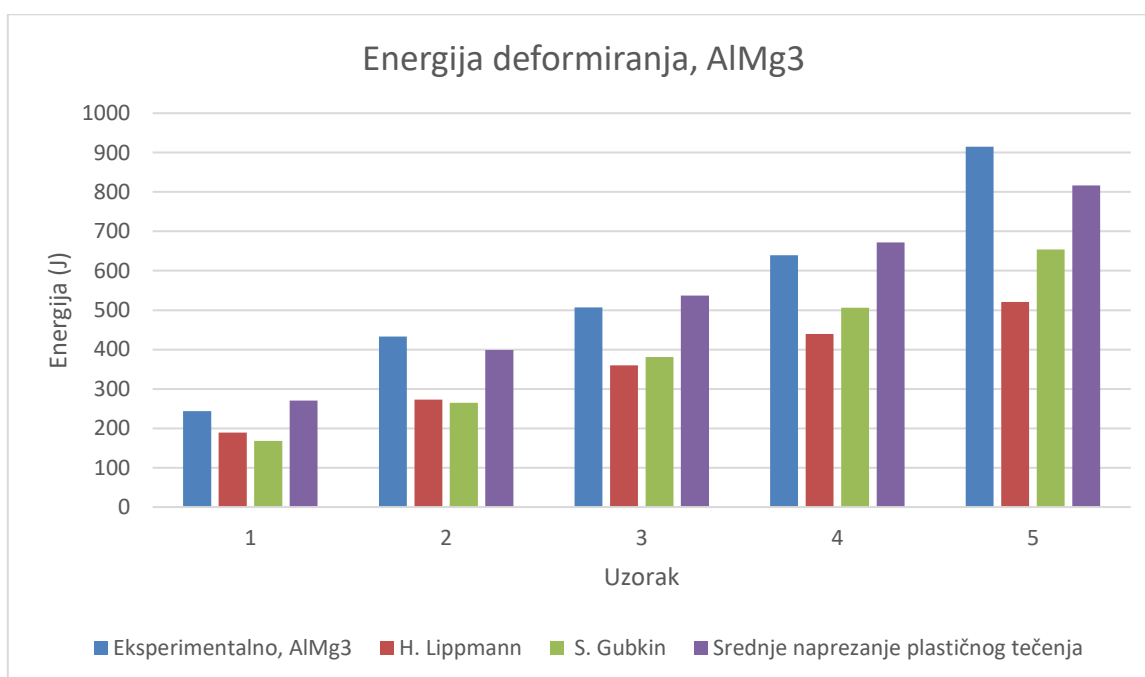
Uzorak	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J
	Eksperimentalno		H. Lippmann		S. Gubkin		Srednje naprezanje plastičnog tečenja	
1	84,55	243,93	65,60	189,25	58,26	168,07	93,67	270,25
2	108,53	433,03	68,36	272,75	66,30	264,52	100,03	399,11
3	101,26	506,81	71,81	359,42	76,07	380,74	107,30	537,05
4	108,53	639,24	74,57	439,24	85,91	506,03	114,08	671,95
5	135,91	914,67	77,34	520,47	97,17	653,95	121,32	816,47

Po prikazanim podacima u tablici 12, slikama 31 i 32, analitički dobivene sile i energije preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) su najbliže eksperimentalnim vrijednostima sila i energija tj. ovisno o uzorku, u nekom slučaju su veće,

dok su u nekom manje od sila i energija korištenih tijekom ispitivanja. Sile i energije dobivene analitičkim pristupom preko preostalih metoda znatno su manje nego one kod ispitivanja.



Slika 31. Grafički prikaz sila sabijanja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMg3



Slika 32. Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMg3

5.2.2. Sabijanje uzoraka legure AlMgSi

Sabijeni uzorci prikazani su na slici 33. Vidljivo je kako povećanjem stupnja logaritamske deformacije dolazi do pojave bačvanja ali u ovom slučaju kao i u prethodnom slučaju dolazi i

do nagibanja uzoraka. Mogući razlog tome je preveliki omjer početne visine uzoraka i početnog promjera, h/d .

Očitani pritisak preše tijekom sabijanja preračunat je u silu sabijanja pomoću tablice iz priloga (I), te su dobivene vrijednosti sila zapisane u tablici 13.



Slika 33. Cilindrični uzorci nakon sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1

Tablica 13. Korištena sila za sabijanje uzoraka na određenu visinu, legura AlMgSi1

Uzorak	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm	Pritisak sabijanja p , Mpa	Sila sabijanja F , kN
1	32	16	26,81	3,33	115,37
2	32	16	25,41	3,92	135,91
3	32	16	23,85	4,02	139,62
4	32	16	22,35	3,82	132,74
5	32	16	21,1	4,12	142,75

Proračun za energiju deformiranja tijekom ispitivanja jednak je kao i u prethodnom slučaju 5.2.1. stoga je taj proračun preskočen dok su rezultati zapisani u tablici 14.

Tablica 14. Energija sabijanja cilindričnih uzoraka hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1

Uzorak	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Konačna visina uzorka $h1$, mm	Pritisak sabijanja p , Mpa	Sila sabijanja F , kN	Energija sabijanja W , J
1	32	16	26,81	3,33	115,37	299,39
2	32	16	25,41	3,92	135,91	447,82
3	32	16	23,85	4,02	139,62	568,95
4	32	16	22,35	3,82	132,74	640,47
5	32	16	21,1	4,12	142,75	777,99

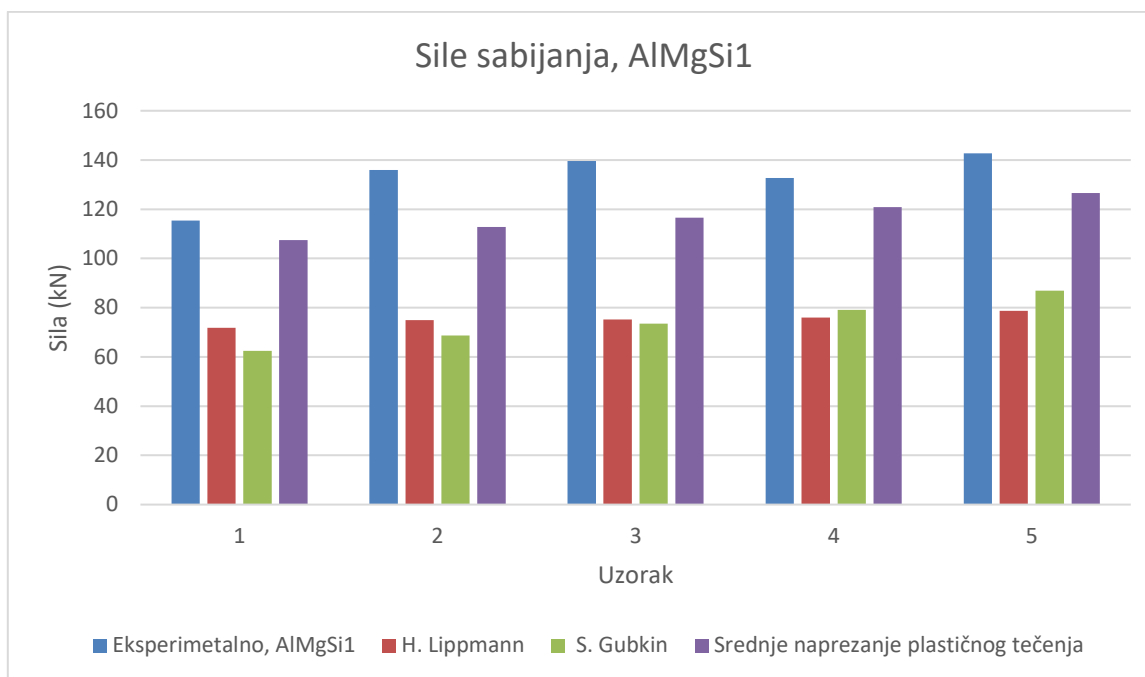
Kako se ispitivanje na hidrauličnoj preši vršilo na način da se uzorci sabijaju na visinu na koju su sabijeni uzorci ispitivani na gravitacijskom batu, potrebne sile i energije sabijanja prema 4.1. Metoda prema H. Lippmannu, 4.2. Metoda prema S. Gubkinu te preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) biti će jednake kao što je izračunato za ispitivanje batom u poglavlju 5.1.2. Tako da se proračun nije ponovno provodio već su rezultati samo prikazani u tablici 15, te na slikama 34 i 35.

Potrebnu silu i energiju za sabijanje prema 4.3. Metoda prema K. Reicherteru nije moguće provesti zbog toga što prilikom sabijanja hidrauličnom prešom dolazi do nagibanja uzoraka što je već ranije navedeno kao nedostatak ove metode zbog ograničenja odnosa h/d uzoraka prije sabijanja.

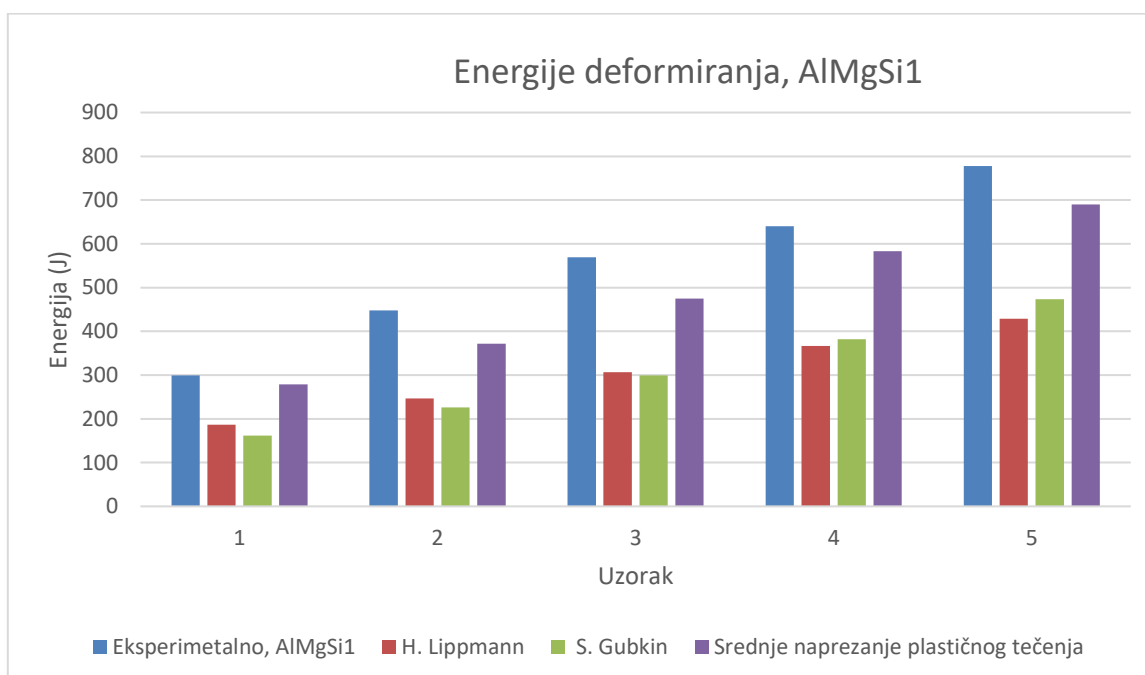
Tablica 15. Sile sabijanja i energije deformiranja na preši, legura AlMgSi1

Uzorak	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J
	Eksperimentalno		H. Lippmann		S. Gubkin		Srednje naprezanje plastičnog tečenja	
1	115,37	299,39	71,81	186,35	62,40	161,92	107,49	278,95
2	135,91	447,82	74,92	246,86	68,68	226,31	112,85	371,84
3	139,62	568,95	75,26	306,70	73,51	299,56	116,61	475,18
4	132,74	640,47	75,95	366,48	79,17	381,97	120,85	583,08
5	142,75	777,99	78,72	429,00	86,90	473,63	126,60	689,97

Iz podataka prikazanih u tablici 15 te na slikama 34 i 35 analitički dobivene sile i energije preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) su najbliže vrijednostima sila i energija korištenih tijekom ispitivanja, dok su sile i energije dobivene analitičkim pristupom preko preostalih metoda znatno manje nego one kod ispitivanja.



Slika 34. Grafički prikaz sile sabijanja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1

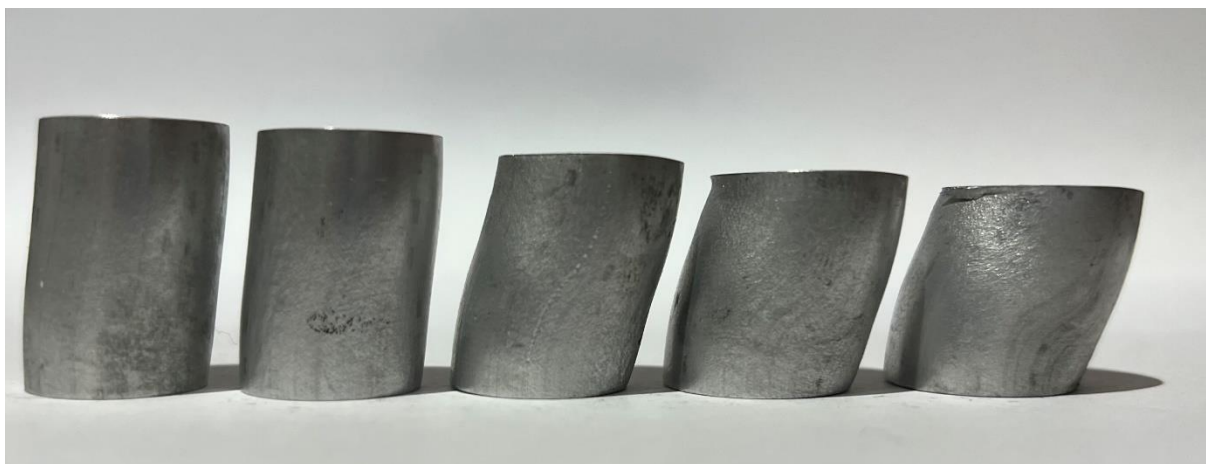


Slika 35. Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlMgSi1

5.2.3. Sabijanje uzoraka AlCuBiPb

Sabijeni uzorci prikazani su na slici 36. Vidljivo je kako i u ovom slučaju povećanjem logaritamskog stupnja deformacije dolazi do pojave bačvanja ali u ovom slučaju kao i u prethodnim slučajevima dolazi do nagibanja uzoraka. Mogući razlog tome je preveliki omjer početne visine uzoraka i početnog promjera, h/d .

Očitane vrijednosti pritiska preše tijekom sabijanja preračunate su u sile sabijanja pomoću tablice iz priloga (I), te su dobivene sile prikazane u tablici 16.



Slika 36. Cilindrični uzorci nakon sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb

Tablica 16. Korištena sila za sabijanje uzoraka na određenu visinu, legura AlCuBiPb

Uzorak	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm	Pritisak sabijanja p , Mpa	Sila sabijanja F , kN
1	32	16	25,46	3,92	135,91
2	32	16	24,06	3,92	135,91
3	32	16	22,8	3,82	132,74
4	32	16	21,52	3,92	135,91
5	32	16	20,42	4,41	152,52

Tablica 17. Energija sabijanja cilindričnih uzoraka hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb

Uzorak	Početna visina uzorka h_0 , mm	Početni promjer uzorka d_0 , mm	Konačna visina uzorka h_1 , mm	Pritisak sabijanja p , Mpa	Sila sabijanja F , kN	Energija sabijanja W , J
1	32	16	25,46	3,33	135,91	444,43
2	32	16	24,06	3,92	135,91	539,56
3	32	16	22,8	4,02	132,74	610,60
4	32	16	21,52	3,82	135,91	712,17
5	32	16	20,42	4,12	152,52	883,09

Kako se ispitivanje na hidrauličnoj preši vršilo na način da se uzorci sabijaju na visinu na koju su sabijeni uzorci ispitivani na gravitacijskom batu, potrebne sile i energije sabijanja prema 4.1. Metoda prema H. Lippmannu, 4.2. Metoda prema S. Gubkinu te preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) biti će jednake kao što je izračunato za

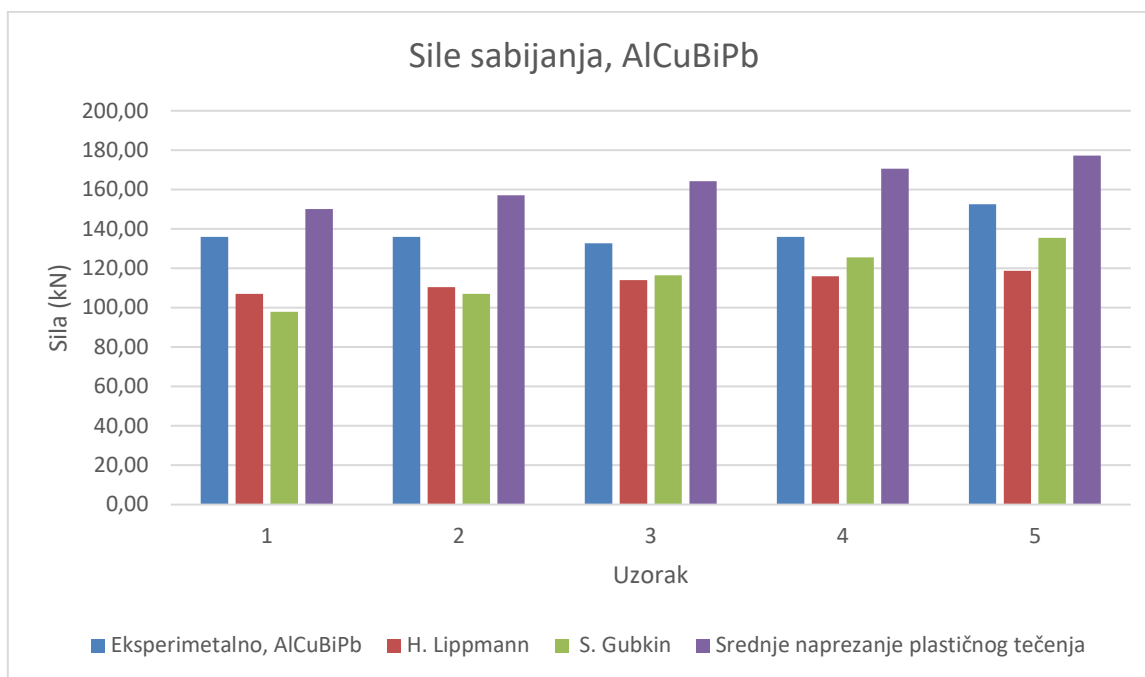
ispitivanje batom u poglavlju 5.1.3. Tako da se proračun nije ponovno provodio već su rezultati samo prikazani u tablici 18, te na slikama 37 i 38.

Potrebnu silu i energiju za sabijanje prema 4.3. Metoda prema K. Reicherteru nije moguće provesti zbog toga što prilikom sabijanja hidrauličnom prešom dolazi do nagibanja uzoraka što je već ranije navedeno kao nedostatak ove metode zbog ograničenja odnosa h/d uzoraka prije sabijanja.

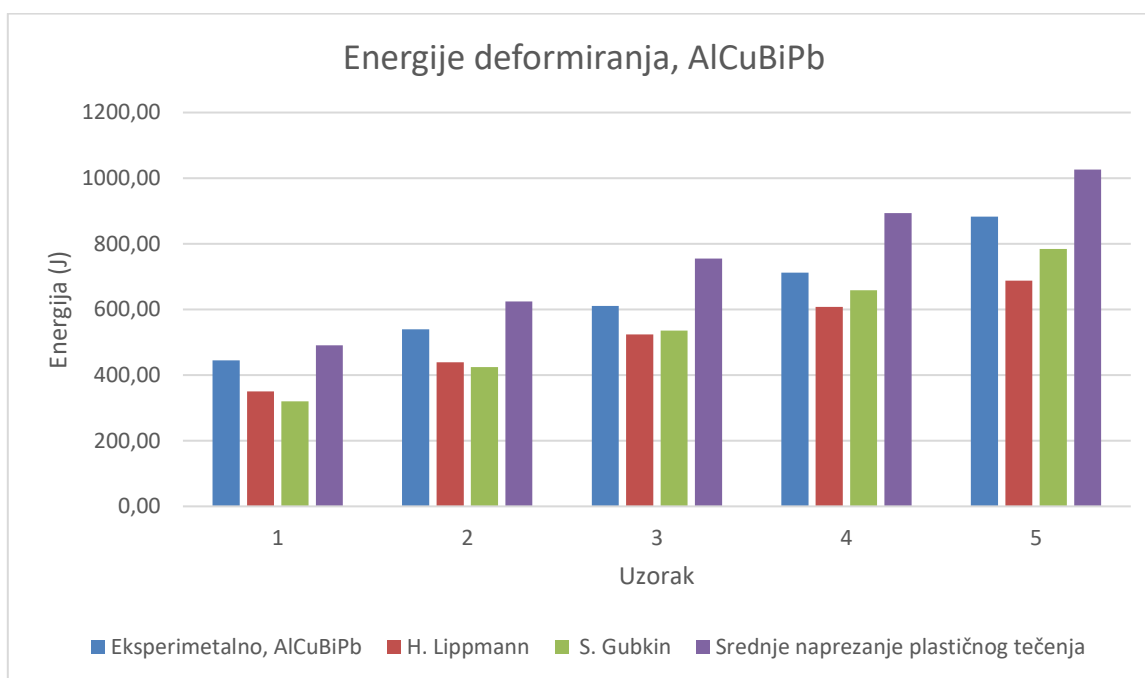
Tablica 18. Sile sabijanja i energije deformiranja na preši, legura AlCuBiPb

Uzorak	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J	Sila F , kN	Energija W , J
	Eksperimentalno		H. Lippmann		S. Gubkin		Srednje naprezanje plastičnog tečenja	
1	135,91	444,43	107,03	349,98	97,92	320,21	150,13	490,94
2	135,91	539,56	110,48	438,60	106,97	424,65	157,14	623,86
3	132,74	610,60	113,93	524,08	116,40	535,46	164,16	755,16
4	135,91	712,17	116,00	607,85	125,57	657,99	170,50	893,45
5	152,52	883,09	118,76	687,65	135,49	784,46	177,21	1026,05

Po prikazanim podacima u tablici 18, kao i na slikama 37 i 38 analitički dobivene sile i energije preko srednjeg naprezanja plastičnog tečenja (elementarne teorije plastičnosti) su najbliže vrijednostima sila i energija korištenih tijekom ispitivanja. U ovom slučaju izračunate sile preko H. Lippmannove i metode i dalje su manje od eksperimentalnih ali su mnogo bliže eksperimentalnim silama nego u prijašnjim slučajevima drugih legura. Sile i energije dobivene analitičkim pristupom preko S. Gubkinove metode povećanjem logaritamskog stupnja deformacije približavaju se eksperimentalnim silama ali i dalje su manje.



Slika 37. Grafički prikaz sile sabijanja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb



Slika 38. Grafički prikaz energija deformiranja prilikom sabijanja hidrauličnom prešom, legura AlCuBiPb

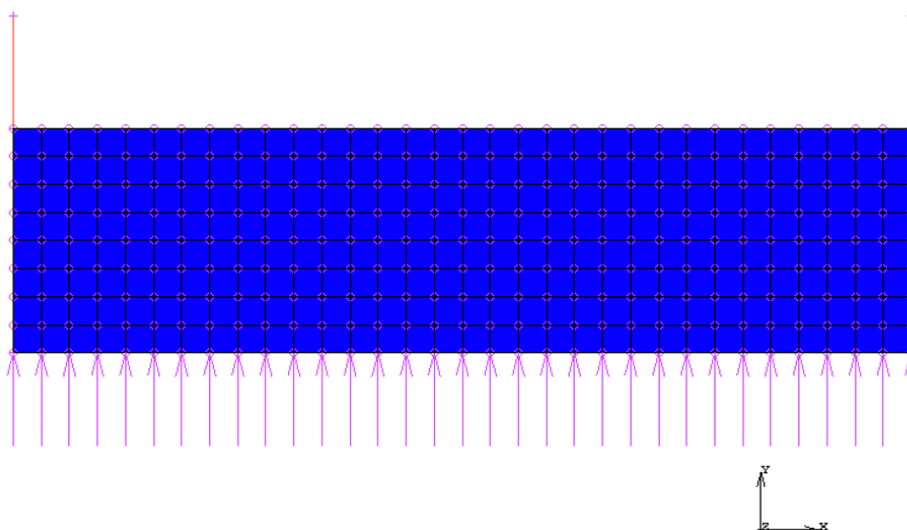
Uspoređujući sve rezultate sabijanja hidrauličnom prešom moglo bi se reći kako je metoda srednjeg naprezanja plastičnog tečenja od analitičkih metoda najpouzdanija što se tiče izračuna sile. Uspoređujući sa silama sabijanja na hidrauličnoj preši za svaku leguru, sila dobivena preko metode srednjeg naprezanja plastičnog tečenja najbliža je po apsolutnoj vrijednosti

eksperimentalnoj sili, dok sile računajući preko ostalih metoda su znatno manje u odnosu na eksperimentalne sile.

6. RAČUNALNA SIMULACIJA

Nakon eksperimentalnog ispitivanja sabijanja cilindričnih uzoraka provodi se računalna simulacija sabijanja cilindričnih uzoraka pomoću hidraulične preše u programu MSC Marc Mentat. Provest će se tri simulacije po jedna za svaku leguru korištenu u eksperimentalnom dijelu.

Unutar programa najprije se konstruira cilindrični uzorak, te dvije linije od kojih lijeva linija prikazuje malj, a desna nakovanj. Cilindrični uzorak je deformabilan dok su malj i nakovanj kruta tijela. Konstrukciji cilindričnog uzorka dodaje se mreža konačnih elemenata. Za ovu simulaciju sabijanja dodaje se mreža 32 x 8. Povećanjem broja elemenata unutar mreže simulacija će biti preciznija. Mreža konačnih elemenata pridružena konstrukciji cilindričnog valjčića, te linije koje predstavljaju nakovanj i malj prikazane su na slici 39.

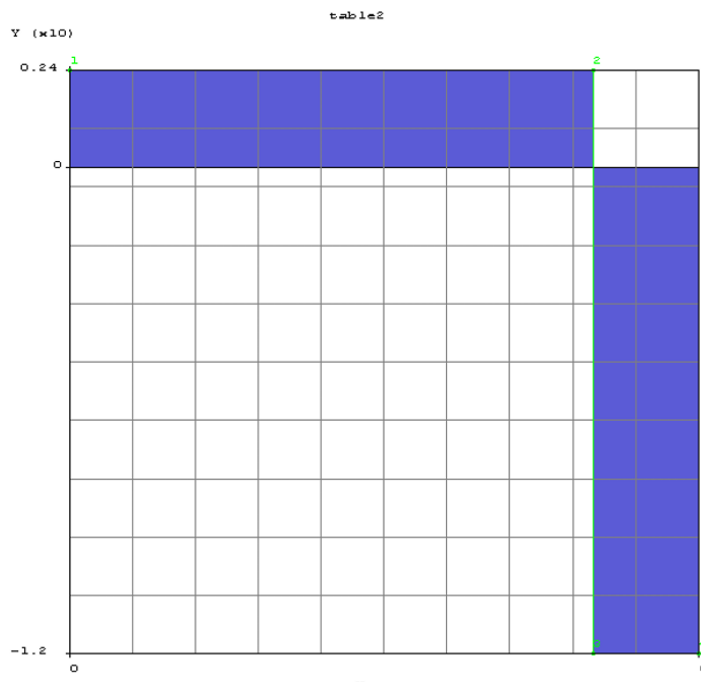


Slika 39. Konstrukcija cilindričnog uzorka sa mrežom konačnih elemenata

Tablica 19. Odnos vremena i brzine hidraulične preše

t, s	$v, mm/s$
0	12/5
5	12/5
5	-5*12/5
6	-5*12/5

Odnos vremena i brzine malja hidraulične preše prikazan je u tablici 19, u programu se izrađuje tablica po vrijednostima iz navedene tablice. Izrađena tablica pridružuje se malju jer on vrši gibanje. Brzina gibanja malja hidraulične preše, njezin radni i povratni hod prikazan je na slici 40.



Slika 40. Radni i povratni hod alata hidraulične preše

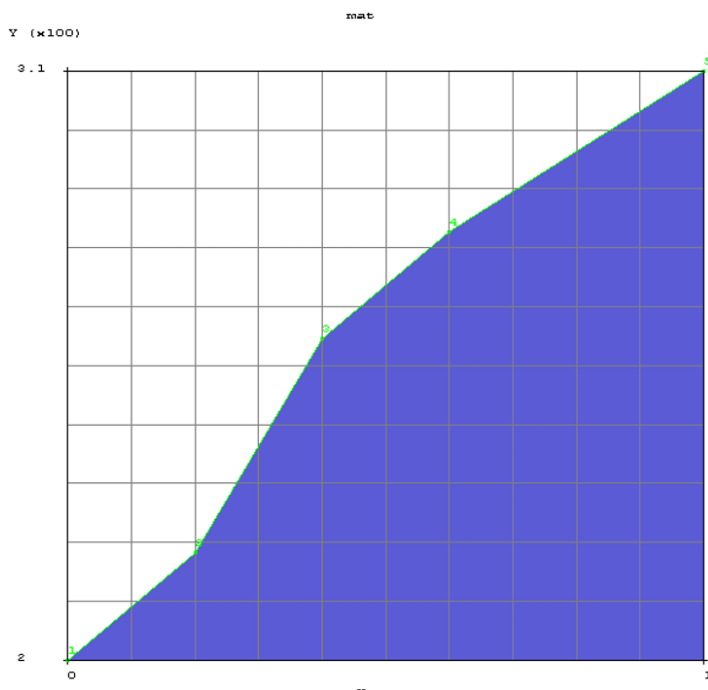
U sve tri simulacije konstrukcija cilindričnog uzorka je identična kao i radni i povratni hod alata hidraulične preše. Razlikuju se krivulje tečenja materijala za svaki pojedini materijal.

6.1. Sabijanje cilindričnog uzorka materijala AlMg3

Krivulja tečenja za materijal AlMg3 dana je u prilogu (II), iz krivulje tečenja očitane su vrijednosti naprežanja plastičnog tečenja za logaritamski stupanj deformacije pri sobnoj temperaturi. Očitane vrijednosti prikazane su u tablici 20. Pomoću tih podataka izrađuje se krivulja tečenja u programu. Izrađena krivulja tečenja u programu prikazana je na slici 41.

Tablica 20. Krivulja tečenja materijala AlMg3

φ	$k_f, \text{N/mm}^2$
0	200
0,2	220
0,4	260
0,6	280
0,8	300
1	310

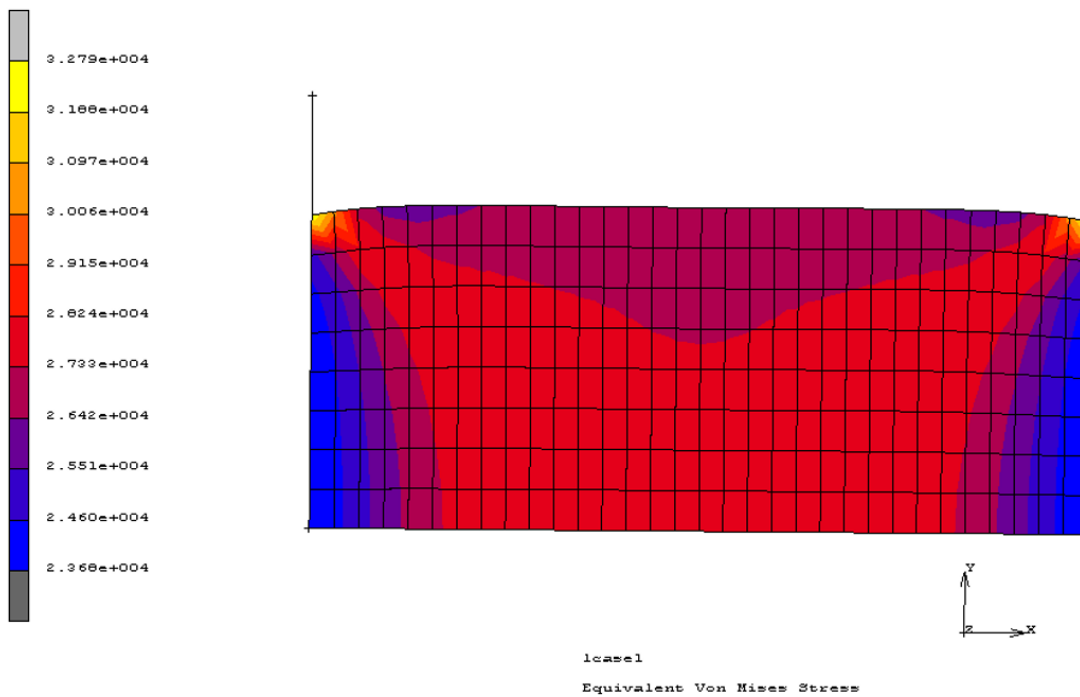


Slika 41. Krivulja tečenja materijala AlMg3

Nakon definiranja krivulje tečenja prije pokretanja simulacije, potrebno je odabrati vrijeme opterećivanja i rasterećivanja. Vrijeme opterećivanja u ovom slučaju je 5 sekundi, te se mjeri u 100 koraka. Dok vrijeme rasterećivanja, odnosno povratak alata iznosi 1 sekundu u 1 koraku.

Pokretanjem simulacije dobivena je raspodjela napreznja prema von Misesu prikazana na slici 42. Slika prikazuje pravilno tečenje materijala, uz vidljive razlike napreznja. Dolazi do postepenog bačvanja. Najmanje napreznje je prikazano plavom bojom, nalazi se na dodiru malja i uzorka te nakovnja i uzorka. Umjereno napreznje prikazano je crvenom bojom, najvećim dijelom nalazi se na obodu cilindričnog uzorka. Najveća napreznja prikazana su žutom i narančastom bojom, napreznje prikazano narančastom bojom zauzima veći dio centra, te se proteže do vanjskih rubova uzorka gdje je intenzitet napreznja najveći i prikazan je žutom bojom.

Inc: 66
Time: 4.300e+000



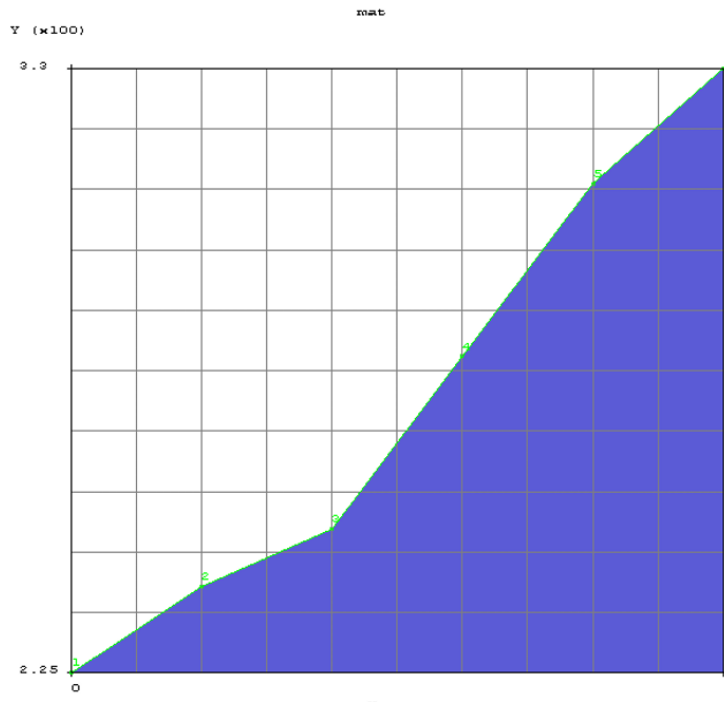
Slika 42. Naprezanja AlMg3

6.2. Sabijanje cilindričnog uzorka materijala AlMgSi1

Kao i za prethodni materijal najprije se iz krivulje tečenja dane u prilogu (III) za materijal AlMgSi1 očitaju vrijednosti naprezanja plastičnog tečenja za pojedine logaritamske stupnjeve deformacije pri sobnoj temperaturi. Očitani podatci su prikazani u tablici 21, te pomoću njih je izrađena krivulja tečenja u programu na slici 43.

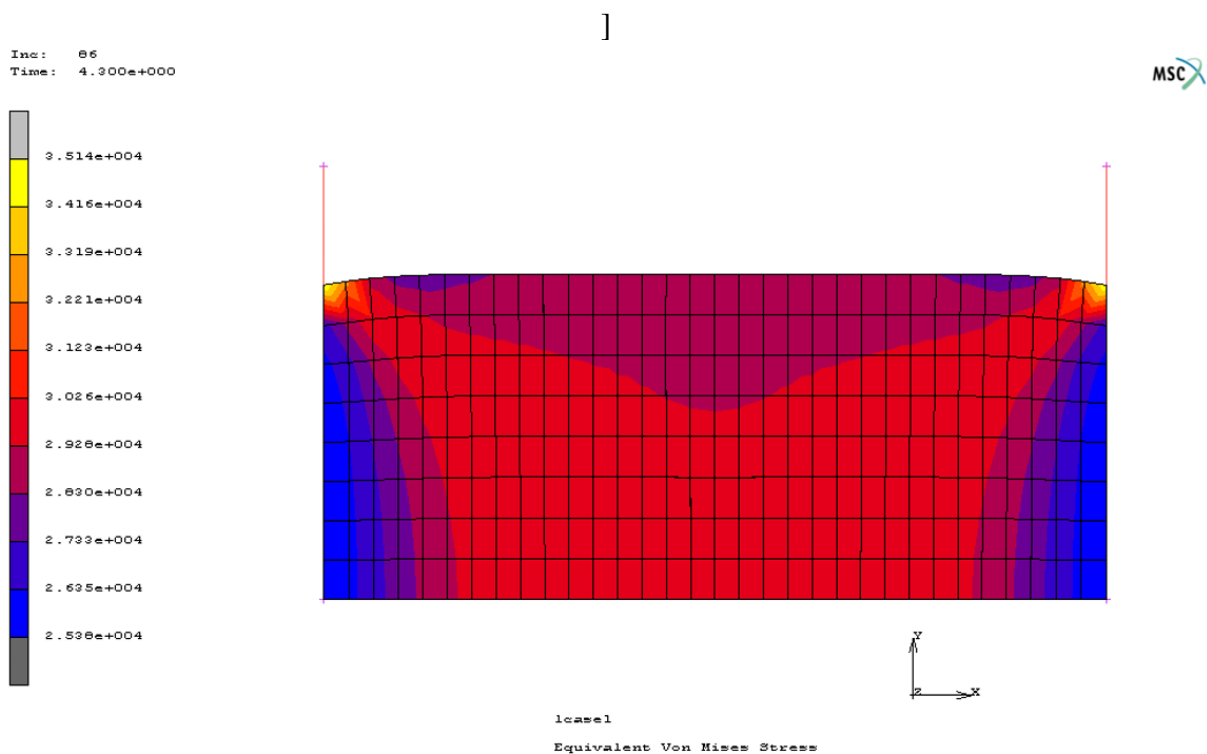
Tablica 21. Krivulja tečenja materijala AlMgSi1

φ	$k_f, \text{N/mm}^2$
0	225
0,2	240
0,4	250
0,6	280
0,8	310
1	330



Slika 43. Krivulja tečenja materijala AlMgSi1

Vrijeme opterećivanja i rasterećivanja su identična kao i kod simulacije sabijanja prethodnog materijala, vrijeme opterećivanja iznosi 5 sekundi, te se mjeri u 100 koraka. Dok vrijeme rasterećivanja, odnosno povratak alata iznosi 1 sekundu, te se odvija u 1 koraku.



Slika 44. Naprezanja AlMgSi1

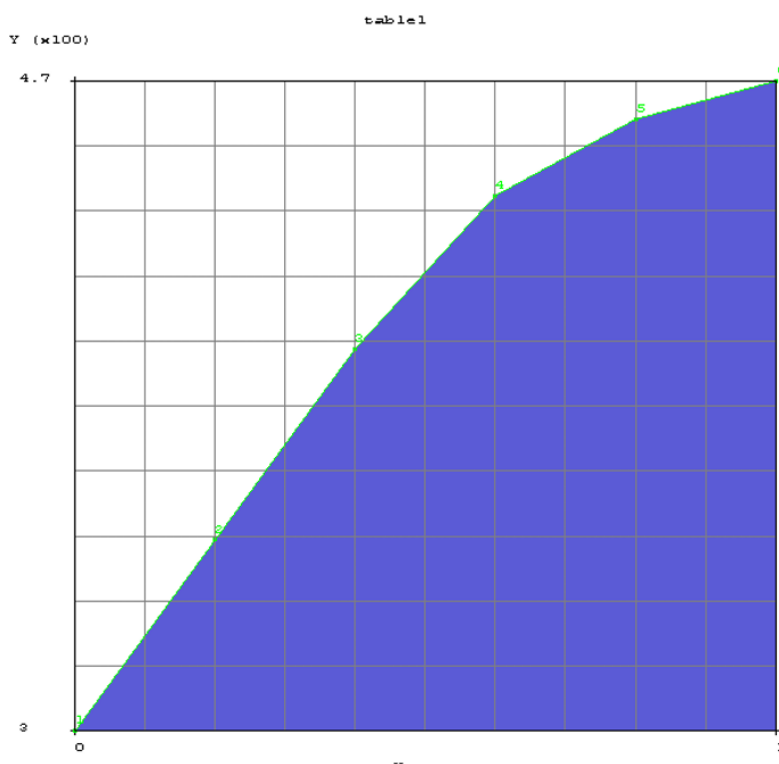
Raspodjela naprezanja po površini uzorka na slici 44 jednaka su kao i kod prethodnog uzorka, samo što su sva naprezanja većeg intenziteta nego na prethodnoj simulaciji. I u ovom slučaju dolazi do bačvanja.

6.3. Sabijanje cilindričnog uzorka materijala AlCuBiPb

Kao i za prethodne simulacije najprije se iz krivulje tečenja dane u prilogu (IV) za materijal AlCuBiPb očitaju vrijednosti naprezanja plastičnog tečenja za pojedine logaritamske stupnjeve deformacije pri sobnoj temperaturi. Očitani podatci su prikazani u tablici 22, te pomoću njih je izrađena krivulja tečenja u programu na slici 45.

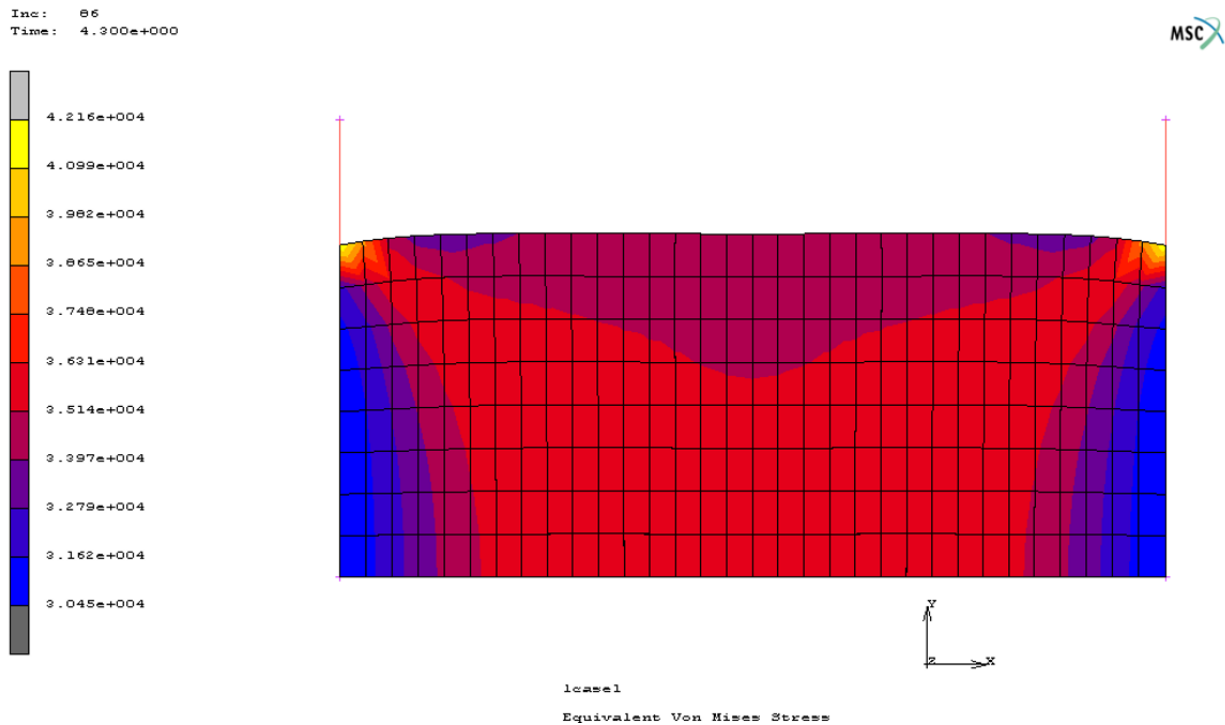
Tablica 22. Krivulja tečenja materijala AlCuBiPb

φ	$k_f, \text{N/mm}^2$
0	300
0,2	350
0,4	400
0,6	440
0,8	460
1	470



Slika 45. Krivulja tečenja materijala AlCuBiPb

Vrijeme opterećivanja i rasterećivanja su identična kao i za prethodne simulacije sabijanja, vrijeme opterećivanja iznosi 5 sekundi, te se mjeri u 100 koraka. Dok vrijeme rasterećivanja, odnosno povratak alata iznosi 1 sekundu, te se odvija u 1 koraku.



Slika 46. Naprezanje AlCuBiPb

Kao i na prethodne dvije simulacije i u ovoj dolazi do bačvanja cilindričnog uzorka. Raspodjela naprezanja po površini uzorka na slici 46 jednaka su kao i kod prethodne dvije simulacije za materijal AlMg3 i AlMgSi1, samo što su sva naprezanja većeg intenziteta nego na prethodnim simulacijama. Ova simulacija prikazuje kako se prilikom sabijanja materijala AlCuBiPb postižu najveća naprezanja u usporedbi sa prethodnim simulacijama.

7. ZAKLJUČAK

Kovanje je tehnika oblikovanja metala korištenjem kompresijskih, lokaliziranih sila, jedan je od najstarijih postupaka oblikovanja deformiranjem. Od svog nastanka doživjelo je značajne promjene, što ga je rezultiralo učinkovitijim, bržim, procesom zato što se danas kovanje najčešće izvodi pomoću kovačkih preša ili batova. Sabijanje spada u postupak slobodnog kovanja, kod kojeg se istovremeno prilikom deformacije smanjuje visina te povećava poprečni presjek materijala.

U ovome radu ukratko su opisani osnovni pojmovi oblikovanja deformiranjem, kao i sama tehnologija kovanja. Analiziran je postupak aksijalnog slobodnog sabijanja cilindričnih uzoraka 3 aluminijske legure, AlMg3, AlMgSi1 i AlCuBiPb. Izračunata je potrebna sila oblikovanja prilikom sabijanja cilindričnih uzoraka putem 3 metode koje koriste maksimalno naprezanje plastičnog tečenja te jedne metode koja koristi srednje naprezanje plastičnog tečenja iz elementarne teorije plastičnosti za različite iznose logaritamskog stupnja deformacije. Navedeni postupak je obrađen i eksperimentalno sabijanjem po 5 uzoraka svake legure najprije na gravitacijskom batuu, a zatim i na hidrauličnoj preši. Dobivene sile putem eksperimentalnog sabijanja gravitacijskim batom znatno su veće od analitičkih sila, tako da bi se moglo reći kako ni jedna metoda nije potpuno pouzdana za precizan izračun potrebne sile sabijanja na gravitacijskom batuu. Za isti logaritamski stupanj deformacije dobiju se znatno manje sile na hidrauličnoj preši. Uspoređujući sile sabijanja na hidrauličnoj preši svih legura, sile dobivene preko metode srednjeg naprezanja plastičnog tečenja najbliže su po apsolutnoj vrijednosti eksperimentalnim silama, stoga bismo mogli reći kako je ta metoda najpouzdanija za izračun potrebne sile sabijanja na hidrauličnoj preši. Sile dobivene preko ostalih metoda su znatno manje u odnosu na eksperimentalne sile, te po tome baš i nisu pouzdane za izračun potrebne sile sabijanja.

Softverom MSC Marc Mentat simulirani su procesi sabijanja cilindričnih uzoraka na hidrauličnoj preši kako bi se mogao vidjeti dobiveni oblik sabijenog uzorka te naprezanja u njemu. Kako je vidljivo iz slika numeričkih simulacija, raspored naprezanja kod svih triju materijala je jednak, najveće naprezanje se događa u sredini uzorka te se širi prema vanjskim rubovima, dok je najmanje naprezanje na dodiru između malja i uzorka te uzorka i nakovnja. Materijal AlMg3 imao je najmanja naprezanja, materijal AlMgSi1 malo veći intenzitet naprezanja, dok se za materijal AlCuBiPb pokazalo da ima najveća naprezanja.

LITERATURA

- [1] Altan T, Ngaile G, Shen G, editors. Cold and hot forging: fundamentals and applications. Materials Park, OH: ASM International; 2004.
- [2] Math M. Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem. Zagreb: FSB; 2015.
- [3] Schuler GmbH, editor. Metal forming handbook. Berlin ; New York: Springer-Verlag; 1998.
- [4] Musafia B. Obrada metala plastičnom deformacijom. Svjetlost, Izdavačko preduzeće, Sarajevo; 1970.
- [5] Rešković S. Teorija oblikovanja deformiranjem. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet; 2014.
- [6] Predavanja iz kolegija Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem n.d.
- [7] Čaušević M. Teorija plastične prerade metala. Sarajevo: Svjetlost; 1979.
- [8] 5.2.1 The Open Die Process | Forging Industry Association n.d. <https://www.forging.org/forging/design/521-open-die-process.html> (pristupljeno 30. listopada, 2022).
- [9] Boljanovic V. Metal shaping processes: casting and molding, particulate processing, deformation processes, and metal removal. New York: Industrial Press; 2010.
- [10] Open Die Forging vs. Closed Die Forging | Steel Forging n.d. <https://www.steelforging.org/open-die-forging-vs-closed-die-forging/> (pristupljeno 30. listopada, 2022).
- [11] Different Types of Forging Machines and Process 2021. <https://yenaengineering.nl/types-of-forging/> (pristupljeno 6. studenog, 2022).
- [12] Black JT, Kohser RA. DeGarmo's materials and processes in manufacturing. Thirteenth edition. Hoboken: Wiley; 2019.
- [13] Hydraulic Press Machine 101: Everything You Need to Know Explained | MachineMfg 2022. <https://www.machinemfg.com/hydraulic-press-machine/> (pristupljeno 6. studenog, 2022).
- [14] Laboratorijske vježbe - Oblikovanje deformiranjem n.d.
- [15] Povržanović A. Obrade metala deformiranjem. FSB; 1996.

PRILOZI

- I. Poveznica tlaka i sile hidraulične preše
- II. Krivulja tečenja, materijal AlMg3
- III. Krivulja tečenja, materijal AlMgSi1
- IV. Krivulja tečenja, materijal AlCuBiPb

Veliki manometar									
Mpa	kN	Mpa	kN	Mpa	kN	Mpa	kN	Mpa	kN
0,1	4	2,4	83	4,7	163	7	242	9,3	322
0,2	7	2,5	86	4,8	166	7,1	246	9,4	326
0,3	10	2,6	90	4,9	170	7,2	250	9,5	329
0,4	14	2,7	93	5	173	7,3	253	9,6	332
0,5	18	2,8	96	5,1	176	7,4	256	9,7	336
0,6	22	2,9	100	5,2	180	7,5	260	9,8	339
0,7	25	3	103	5,3	184	7,6	263	9,9	342
0,8	28	3,1	107	5,4	187	7,7	266	10	346
0,9	32	3,2	111	5,5	190	7,8	270	10,1	349
1	35	3,3	114	5,6	194	7,9	274	10,2	353
1,1	39	3,4	118	5,7	197	8	277	10,3	356
1,2	42	3,5	122	5,8	200	8,1	280	10,4	360
1,3	45	3,6	125	5,9	204	8,2	283	10,5	363
1,4	48	3,7	128	6	208	8,3	287	10,6	366
1,5	52	3,8	132	6,1	211	8,4	290	10,7	369
1,6	55	3,9	135	6,2	214	8,5	294	10,8	373
1,7	59	4	139	6,3	218	8,6	297	10,9	377
1,8	62	4,1	142	6,4	221	8,7	300	11	381
1,9	66	4,2	146	6,5	225	8,8	304	11,1	384
2	70	4,3	149	6,6	229	8,9	308	11,2	387
2,1	73	4,4	152	6,7	232	9	312	11,3	391
2,2	76	4,5	156	6,8	235	9,1	315	11,4	394
2,3	80	4,6	160	6,9	239	9,2	318	11,5	397

