

# Utjecaj trenja na silu deformiranja u procesu slobodnog kovanja

---

**Turkalj, Katarina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:454594>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Katarina Turkalj**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Katarina Turkalj

Zagreb, 2022.

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

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

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je bila najveća podrška i oslonac tijekom dosadašnjeg studija.

Katarina Turkalj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Katarina Turkalj** JMBAG: 0035215202

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj trenja na silu deformiranja u procesu slobodnog kovanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of friction on deformation force in the open die forging process**

Opis zadatka:

U postupcima oblikovanja deformiranjem trenje značajno utječe na proces plastičnog tečenja materijala. Usljed povećanog faktora trenja materijal otežano teče u blizini kontaktnih površina sa alatom. Kao posljedica toga, dolazi do povećanja ukupne sile deformiranja.

U radu je potrebno proučiti teoriju utjecaja trenja na silu kovanja kod slobodnog kovanja između dviju ravnih ploha. Usporediti složenost utjecaja trenja sa procesima kovanja u ukovnjima.

Nadalje, potrebno je eksperimentalno ispitati postupak slobodnog kovanja aluminijskih uzoraka različite hrapavosti površina uz primjenu različitih tipova maziva. Mjeriti silu deformiranja tijekom procesa deformiranja za oba promjenjiva parametra. Rezultate prikazati tablično i grafički te ih komentirati.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Zdenka Keran

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. TRENJE.....	2
2.1. Vrste trenja .....	3
2.2. Trenje u postupcima oblikovanja deformiranjem .....	4
2.2.1. Bowden – Taborov model trenja.....	5
2.2.2. Rangiranje trenja prema Kloosu .....	5
2.3. Podmazivanje u postupcima oblikovanja deformiranjem .....	6
2.3.1. Osnovna fizikalna i kemijska svojstva maziva .....	7
2.3.2. Podjela maziva prema agregatnom stanju.....	8
2.4. Utjecaj čimbenika na trenje prilikom oblikovanja deformiranjem .....	9
3. KOVANJE.....	10
3.1. Slobodno kovanje.....	11
3.2. Kovanje u ukovnju .....	16
3.3. Usporedba slobodnog kovanja i kovanja u ukovnju .....	18
3.4. Utjecaj trenja na raspored naprezanja kod slobodnog kovanja pravokutne prizme... ..	18
4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE .....	20
4.1. Osnovne informacije prije ispitivanja .....	20
4.2. Proračun faktora kontaktnog trenja.....	22
4.3. Ispitivanje uzoraka bez maziva .....	24
4.3.1. Odnos površina glatko – glatko .....	24
4.3.2. Odnos površina glatko – hrapavo .....	26
4.3.3. Odnos površina hrapavo – hrapavo.....	28

---

4.4.	Ispitivanje uzoraka s mazivom.....	30
4.4.1.	Odnos površina glatko – glatko .....	30
4.4.2.	Odnos površina glatko – hrapavo .....	32
4.4.3.	Odnos površina hrapavo – hrapavo.....	34
4.5.	Usporedba sila sabijanja.....	36
4.5.1.	Ovisnost sile sabijanja o faktoru kontaktnog trenja .....	36
5.	ZAKLJUČAK.....	38
	LITERATURA.....	39





**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Karakteristike slobodnog kovanja i kovanja u ukovnju [5] .....	18
Tablica 2. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – G, bez maziva.....	24
Tablica 3. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – H, bez maziva.....	26
Tablica 4. Rezultati ispitivanja odnosa površina H – H, bez maziva.....	28
Tablica 5. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – G, s mazivom .....	30
Tablica 6. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – H, s mazivom .....	32
Tablica 7. Rezultati ispitivanja odnosa površina H – H, s mazivom .....	34
Tablica 8. Usporedba srednjih vrijednosti sila i koeficijenata trenja .....	36

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$G$	N	Težina tijela
$F$	N	Vanjska sila
$N$	N	Normalna sila
$F_t$	N	Sila trenja
$\mu$	-	Faktor kontaktnog trenja
$A$	mm <sup>2</sup>	Površina uzorka
$p_{sr}$	N/mm <sup>2</sup>	Srednji specifični pritisak
$d_1$	mm	Promjer uzorka nakon deformacije
$h_1$	mm	Visina uzorka nakon deformacije
$d_0$	mm	Promjer uzorka prije deformacije
$h_0$	mm	Visina uzorka prije deformacije
$k_f$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje plastičnog tečenja
$g$	m/s <sup>2</sup>	Ubrzanje sile teže, $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$
$\varphi$	-	Logaritamski stupanj deformacije

## SAŽETAK

U ovom završnom radu bilo je potrebno, pomoću eksperimentalne analize, objasniti utjecaj trenja na silu deformiranja u procesu slobodnog kovanja te proračunati koeficijent kontaktnog trenja za različite odnose kontaktnih površina. U teorijskom dijelu ukratko je opisana pojava trenja, kako se ona očituje pri procesima oblikovanja metala deformiranjem, koje vrste trenja postoje te kako maziva mogu utjecati na njegovo smanjenje. Uz to, opisan je postupak oblikovanja kovanjem, a fokus je stavljen na proces slobodnog kovanja gdje uslijed djelovanja sile trenja na kontaktnim površinama alata i obratka dolazi do otežanog tečenja materijala te pojave bačvanja. Objasnen je i raspored naprezanja na tlačnoj površini pravokutne prizme koji se kasnije u eksperimentalnom dijelu koristi za izračun koeficijenta trenja. Na temelju provedenog ispitivanja te sakupljenih informacija iz izvora literature, donesen je zaključak o utjecaju trenja na silu deformiranja nekog materijala.

Ključne riječi: trenje, faktor kontaktnog trenja, mazivo, slobodno kovanje, bačvanje

## **SUMMARY**

In this thesis it was necessary, using experimental analysis, to explain the influence of friction on the deformation force in the process of free forging and to calculate the coefficient of contact friction for different contact surfaces. The theoretical part briefly describes the phenomenon of friction, how it is manifested in deformation forming technology, what types of friction exist and how lubricants can affect it. Also, the forging process is described, with the focus on free forging where, due to the action of friction forces between the tool and workpiece, there is a difficult material flow and the phenomenon of barreling. The stress distribution on the surface of a rectangular prism is shown, which is later used in the experimental part to calculate the coefficient of friction. A conclusion about the influence of friction on the deformation force was made based on the conducted research and the information collected from the literature.

Key words: friction, coefficient of friction, lubricant, free forging, barreling

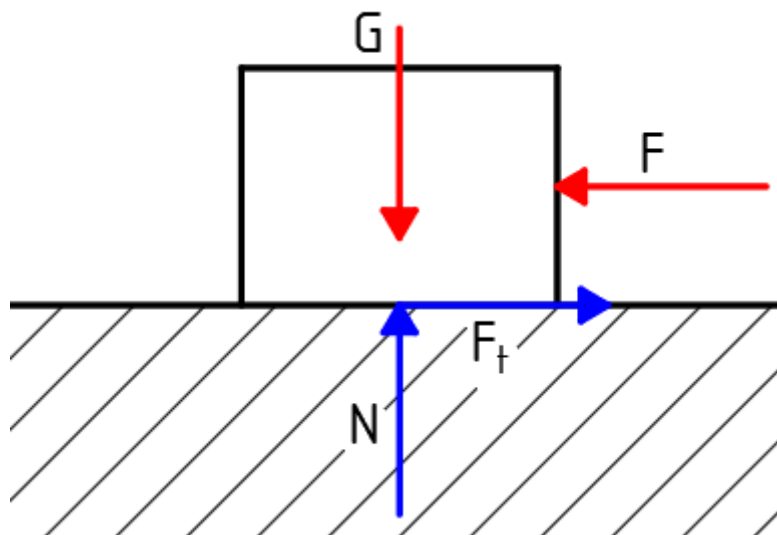
## 1. UVOD

Kovanje je jedan od brojnih postupaka oblikovanja metala deformiranjem. Tim postupkom se višestrukim udarcima malja po najčešće zagrijanom metalu, tj. sirovcu, tlačnom silom vrši oblikovanje te se tako postiže željeni oblik, odnosno otkovak. Slobodno kovanje je ono kod kojeg se željeni oblik postiže bez korištenja posebnog alata ili pomoću vrlo jednostavnih alata. Tečenje metala tijekom procesa deformiranja je slobodno i neograničeno u smjeru okomitom na pravac djelovanja sile deformiranja. Takvo slobodno kovanje bitno je različito od kovanja u ukovnjima gdje se metal oblikuje u unutrašnjosti alata – gravuri, a tečenje metala je tijekom deformacijskog procesa ograničeno stijenkama gravure. Slobodno kovanje se primjenjuje za pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju. Sirovac je obično čelični valjani poluproizvod kvadratnog ili kružnog presjeka, a to govori da su i mase relativno male. Valja napomenuti da se slobodno kovanje može koristiti u kombinaciji s kovanjem u ukovnjima kao pripremna faza oblikovanja sirovca prije kovanja u ukovnju. [1]

Tijekom izvođenja procesa slobodnog kovanja, između alata i obratka pojavljuje se kontaktno trenje koje ima negativan utjecaj i nepoželjne posljedice prilikom deformiranja metala. To trenje uzrok je nejednolikog tečenja metala i pojave zaostalih naprezanja koji narušavaju kvalitetu i izgled površine te smanjuju životni vijek alata. Iz tih razloga koriste se sredstva za podmazivanje kako bi smanjila utjecaj trenja, a time i njegove nepoželjne posljedice. Postoji više različitih tipova maziva, a odabir optimalnog sredstva za podmazivanje ovisi o više čimbenika, npr. vrsti procesa oblikovanja, temperaturi obrade te materijalu. [2]

## 2. TRENJE

Trenje je definirano kao otpor koji se pojavljuje na kontaktu dva tijela i djeluje suprotno od njihovog međusobnog gibanja. To gibanje može biti klizanje, ili kotrljanje i valjanje (gdje se javlja kinetičko trenje, odnosno trenje gibanja) te onemogućeno gibanje (gdje se javlja statičko trenje, odnosno trenje mirovanja). Trenje između tijela postoji kada su im površine u dodiru i gibaju se relativnom brzinom u suprotnim smjerovima, a pritom se kinetička energija pretvara u toplinu. Sila trenja direktno je ovisna o normalnoj sili ili sili pritiskanja koja je okomita na površinu tijela, o koeficijentu kontaktnog trenja koji ovisi o hrapavosti površine te o materijalima tijela koja su u dodiru. [2] Na slici 1. prikazano je djelovanje sile trenja na blok uslijed djelovanja neke vanjske sile  $F$ .



Slika 1. Djelovanje sile trenja na blok

$G$  – težina tijela, N

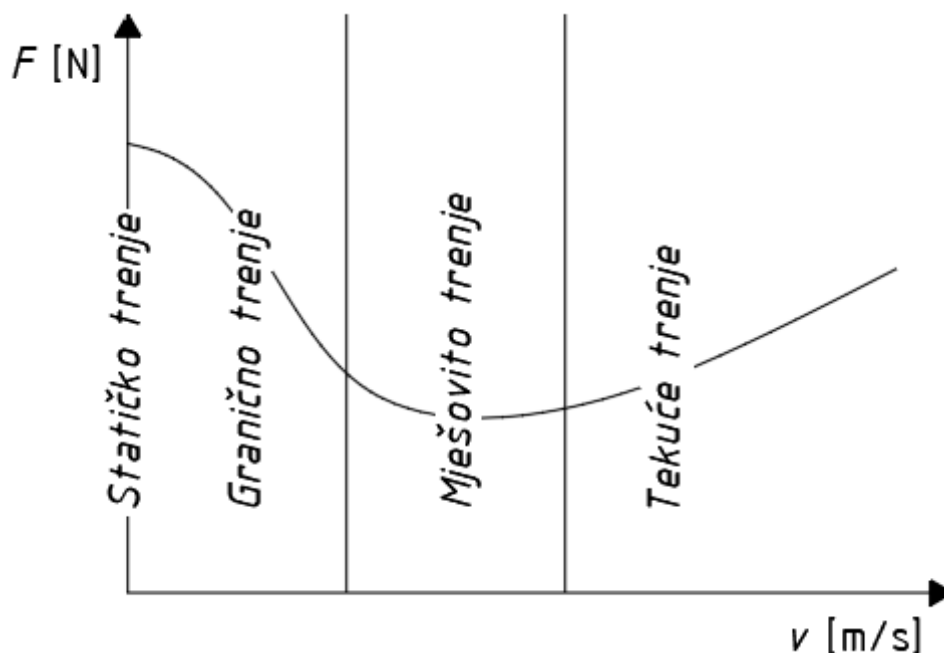
$F$  – vanjska sila, N

$N$  – normalna sila, N

$F_t$  – sila trenja, N

## 2.1. Vrste trenja

Na slici 2. nalazi se graf koji prikazuje kako sila trenja  $F$  ovisi o relativnoj brzini  $v$ . Vidljivo je kako postoje četiri odvojena područja koja se međusobno razlikuju s obzirom na iznos sile trenja između kontaktnih površina. [3]



Slika 2. Ovisnost sile trenja o relativnoj brzini [3]

**Statičko trenje (trenje mirovanja)** – sprječava klizanje koje pokušavaju uzrokovati druge, vanjske sile. U ovom slučaju ne postoji gibanje koje je relativno, a to automatski znači da su dvije površine u izravnom kontaktu.

**Granično trenje** – područje u kojem započinje relativno gibanje, ali pri malim brzinama pa je kontakt sličan kao onaj u kod statičkog trenja. U ovom režimu mazivo nema velik utjecaj jer su brzine premale i zbog toga je teško stvoriti potrebni film koji će razdvojiti površine. Trošenje površina u ovom slučaju je intenzivno jer su površine u direktnom kontaktu.

**Mješovito trenje** – raste relativna brzina čime se počinje stvarati film maziva koji razdvaja površine i time smanjuje silu trenja.

**Tekuće trenje** – stvara se film maziva koji u potpunosti razdvaja kontaktne površine pa je trošenje u ovom režimu zanemarivo. [3]

## 2.2. Trenje u postupcima oblikovanja deformiranjem

Trenje se pojavljuje u svim postupcima oblikovanja metala deformiranjem čime uzrokuje povišenje potrebnih sila deformiranja, nejednoliko tečenje materijala, zaostala naprezanja, utječe na kvalitetu i izgled površine obrađivanog materijala, zahtjeva povećanje potrebnih radnih pritisaka i postojanost alata, a to znači da je potreban i veći utrošak rada deformacije. Oštećenja alata, pojava bačvanja prilikom tlačenja punog cilindra te različiti iznosi tvrdoća u uzdužnom presjeku materijala dokazi su da u realnim postupcima oblikovanja deformiranjem djeluje vanjsko kontaktno trenje. [4]

Kod kretanja dvaju tijela u međusobnom dodiru nužno se mora savladati trenje, a kada između dva tijela ne postoji nikakvo mazivo niti međusloj, veličina sile trenja može se izraziti jednostavnijom formom Coulombova zakona [4]:

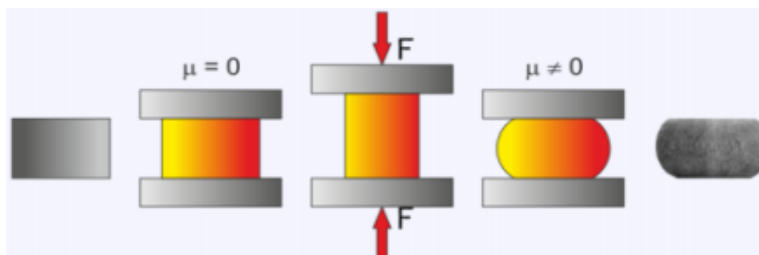
$$T = \mu \cdot N$$

Gdje je:  $T$  – sila trenja, N

$\mu$  – faktor kontaktnog trenja, -

$N$  – normalna sila, N

Iz Coulombova zakona vidljivo je kako trenje ovisi o faktoru kontaktnog trenja i djelujuće normalne sile, dok veličine površina u dodiru, prema Coulombovom zakonu, nemaju nikakav utjecaj. [4] Valja napomenuti kako tijekom procesa deformiranja dolazi do značajnog povećanja kontaktne površine uslijed tečenja materijala uz kontaktnu površinu alata. Ovo značajno povećanje kontaktne površine direktno utječe i na iznos ukupnog trenja što se vidi u svim praktičnim primjerima deformacijskih postupaka. Iz toga se zaključuje kako je uporaba Coulombovog zakona u procesima oblikovanja deformiranjem veoma ograničena i zakon vrijedi samo uz određene rubne uvjete. Na slici 3. prikazano je kako faktor kontaktnog trenja utječe na deformiranje komada pri plastičnoj deformaciji. [2]

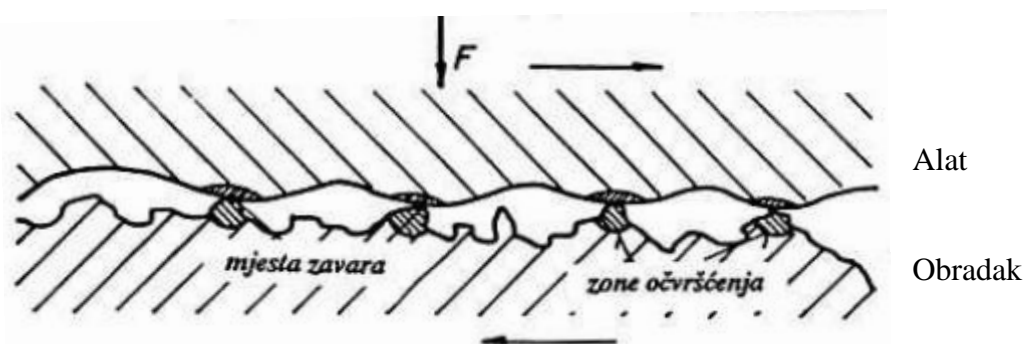


Slika 3. Plastična deformacija komada [2]



### 2.2.1. Bowden – Taborov model trenja

Budući da je pojednostavljeni Coulombov zakon trenja neprimjenjiv za većinu postupaka obrade deformiranjem, u današnje vrijeme koristi se Bowden – Taborov model trenja. Ovaj model u obzir uzima prirodu djelovanja trenja te kako se ono mijenja u ovisnosti o stanju površine i primjeni maziva. Glavna ideja ovog modela je prikazana na slici 4. gdje su dva tijela – alat i obradak, u kontaktu samo na nekim mjestima, odnosno na mjestima gdje su neravnine površina najviše i na jednom i na drugom tijelu. Na tim mjestima, lokalni pritisci jako su veliki pa zbog toga dolazi do zavarivanja obratka i čestica alata. [4]

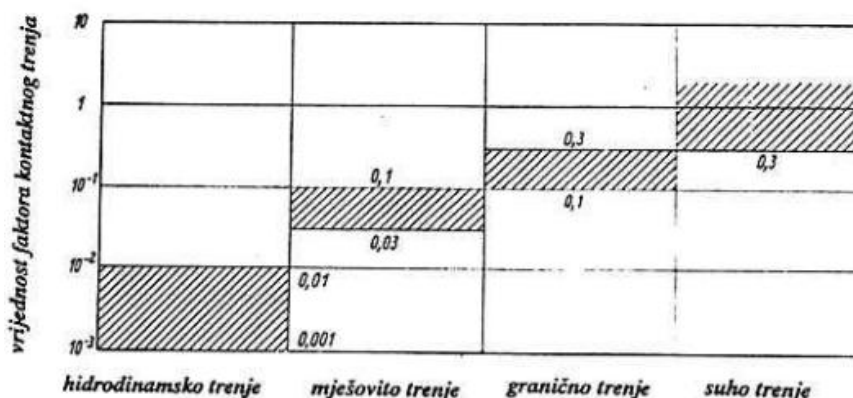


Slika 4. Trenje prema modelu Bowden – Tabor [4]

Da bi postojalo tečenje materijala, mora postojati i relativno gibanje između ova dva tijela, a to naposljetku znači i kidanje zavarenih mjesta. Stoga su Bowden i Tabor silu trenja definirali kao ukupnu sumu svih smičnih sila koje su potrebne za prekidanje mjesta zavarivanja. Ovakav model vrijedi za čiste metalne površine, dok se u stvarnosti na površini metala uvijek pojavljuju oksidi, sulfidi, nečistoće ili mazivo. [4]

### 2.2.2. Rangiranje trenja prema Kloosu

Uzimajući u obzir do sad napisano o Bowden – Taborovom modelu trenja, postavlja se rangiranje trenja prema K. H. Kloosu koje je prikazano na slici 5., a ispod slike ukratko je opisan svaki tip trenja. [4]



Slika 5. Trenje prema Kloosu [4]

- 1) Hidrodinamičko trenje ( $\mu \approx 0,001$  ili manje) – trenje između površine alata i obratka kada oni ne dolaze u neposredni dodir jer se između njih uvijek nalazi sloj maziva (pri čemu se javlja unutarnje trenje maziva).
- 2) Mješovito trenje ( $\mu \approx 0,1$ ) – javlja se u prostoru između površina alata i obratka gdje postoji sloj kapljevitoz maziva. U ovom slučaju čestica zavara je odlomljena i slobodno pliva u mazivu te ne dolazi u kontakt ni s alatom ni s obratkom jer ga mazivo spriječava.
- 3) Granično trenje ( $\mu \approx 0,3$ ) – javlja se kada između površina alata i obratka postoji granični sloj maziva koji je vrlo tanak, u teoriji debljine jedne molekule (monomolekularni sloj). Usljed tečenja materijala taj sloj se na nekim dijelovima prekida, zavarene čestice se otkidaju te ulaze u međuprostor alata i obratka gdje mogu oštetiti bilo koju od površina.
- 4) Suho trenje ( $\mu \approx 0,5$ ) – pri pojavi suhog trenja dolazi do zavarivanja čestica frikcijskog para, odnosno slijepljivanja. Budući da je čvrstoća zavarenog spoja veća od čvrstoće materijala obratka, znači da lom nastaje u sloju metala obratka malo ispod zavarenog mjesta, a preostali ispupčeni dio zalijepi se na površinu alata.

### 2.3. Podmazivanje u postupcima oblikovanja deformiranjem

Svrhe primjene tehnoloških maziva su: smanjenje kontaktnog trenja, odvođenje topline i hlađenje alata kako bi se ublažilo habanje, smanjenje otpora deformaciji i rada deformacije te smanjenje pojave lijepljenja na alat. Maziva se mogu podijeliti u osnovne grupe [2]:

- Tekuće emulzije koje se koriste kod hladnog valjanja, kod vrućeg valjanja Al i njegovih legura te kod provlačenja pri velikim brzinama.
- Masti te smjese biljnih i mineralnih ulja koje se primjenjuju pri provlačenju materijala koji imaju veliki otpor prema deformaciji ili prilikom hladnog valjanja.
- Konzistentna maziva koja su zapravo koloidne otopine vode i mineralnih ulja, a povezane su sredstvima za zgrušavanje poput sapuna, voska ili parafina.
- Prozirno – staklasta maziva poput tekućih (mineralnih ulja) pri suspenziji grafita u vodi te sapunski prašak ili sapunska strugotina koji se koriste za duboko vučenje čelika.
- Metalna maziva poput Pb i Cu koji se koriste pri dubokom vučenju čelika visoke čvrstoće.

### **2.3.1. Osnovna fizikalna i kemijska svojstva maziva**

Neka od osnovnih, to jest poželjnih svojstava korištenih mazivih tvari su [2]:

- sposobnost odmašćivanja
- mogućnost ostvarivanja velike adhezije i kohezije (prikazano na slici 6.)
- neagresivno djelovanje na brtve i metale
- dobra kemijska i fizikalna stabilnost
- vodootpornost
- mogućnost brtvljenja
- što manji utjecaj temperature na viskoznost.



Slika 6. Djelovanje adhezije i kohezije kod vode, žive i mineralnog ulja [2]

### 2.3.2. Podjela maziva prema agregatnom stanju

Maziva se prema agregatnom stanju dijele u tri osnovne skupine [2]:

- tekuća maziva (ulje, plin),
- polučvrsta maziva (mazive masti)
- čvrsta maziva.

**Mineralna maziva ulja** – dobivaju se prerađivanjem sirove nafte, a nakon toga se postupkom rafinacije odstrane sve nepoželjne komponente. Mineralna ulja se sastoje od baznog ulja u kojeg se dodaju aditivi, a to su sredstva koja poboljšavaju svojstava. Najznačajnije karakteristike mineralnih ulja su: mazivnost, viskozitet, otpornost prema temperaturi te otpornost prema prašini, vlazi i drugim elementima. [2]

**Mazive masti** – koriste se za podmazivanje dijelova gdje iz nekih razloga nije moguće koristiti ulja i ostala tekuća maziva. Zbog dobrih adhezijskih svojstava, masti imaju sposobnost boljeg i dužeg zadržavanja na površinama, a to znači da su dobri za podmazivanje, zaštitu od korozije i imaju sposobnost sprječavanja ulaska nečistoća i vode. [2]

**Čvrsta maziva** – mogu biti u obliku praha ili tankog filma, a služe za zaštitu površina i smanjenje koeficijenta kontaktnog trenja. Zbog svoje velike termičke stabilnosti i malog koeficijenta trenja, grafit je jedno od čvrstih maziva koje se najčešće koristi. [2]

## 2.4. Utjecaj čimbenika na trenje prilikom oblikovanja deformiranjem

U nastavku su navedeni čimbenici koji utječu na veličinu faktora kontaktnog trenja [2]:

**Mazivo** – pravilnim izborom maziva smanjuje se trenje, a time i sila deformiranja. Kod hladnog oblikovanja deformiranjem moguće je postići trenje vrlo slično hidrodinamičkom trenju uz korištenje maziva što bolje viskoznosti.

**Hrapavost površine alata** – pomaže mazivu da se zadrži na površini, a stvara i pogodne uvjete za postizanje hidrodinamičkog trenja. Površina alata koja ima pravilan i ujednačen reljef hrapavosti najmanje je opterećena silom trenja.

**Hrapavost površine izratka** – važna samo u početku postupka deformacije. Tijekom deformacije, površina izratka u potpunosti postaje sukladna s površinom alata jer je površina izratka puno mekša od površine alata, a mazivo se jednoliko raspoređuje po površini.

**Brzina deformacije** – trenje se smanjuje ukoliko se brzina povećava. U tehnološkoj praksi ova spoznaja se ipak ne može u potpunosti koristiti budući da se oblikovanje provodi na dostupnim strojevima kod kojih rijetko postoji mogućnost promjene brzine deformiranja.

**Temperatura** – vrlo složeno utječe na iznos sile kontaktnog trenja. Budući da se povećanjem temperature ujedno mijenjaju i svojstva maziva, na kontaktnim površinama između alata i obratka stvaraju se oksidi. To dovodi do porasta sile trenja, odnosno deformacijske sile. Ta pojava se ne primjećuje u realnom procesu deformacije zato jer se naprezanje plastičnog tečenja smanjuje kad temperatura metala raste.

**Stupanj deformacije** – utječe na stabilnost sloja maziva. Ako dođe do povećanja stupnja deformacije, onda se sloj maziva razara i istiskuje između površina. U tom slučaju u kontakt dolaze novi dijelovi metala koji na sebi više nemaju sloj maziva, povećava se stupanj deformacije, a ujedno i sila trenja zbog koje onda raste i deformacijska sila.

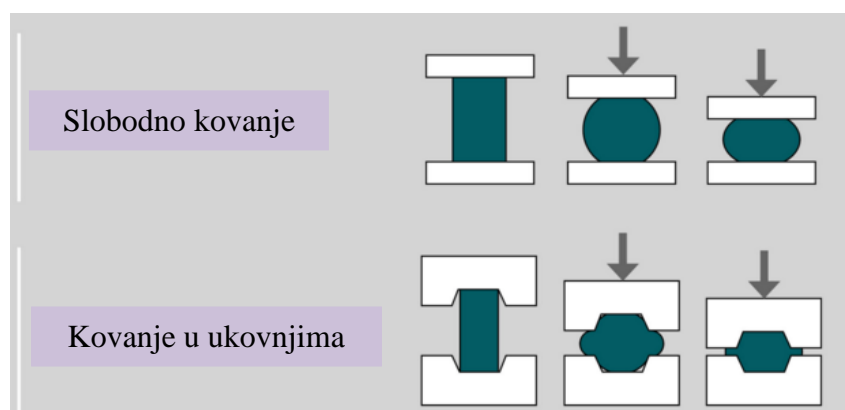
### 3. KOVANJE

Kovanje je postupak oblikovanja koji se najčešće provodi u toplom stanju jer je pri višim temperaturama prisutna veća deformabilnost materijala, a samim time se smanjuje deformacijska sila i utrošak rada. Ovo je i najstariji način obrade metala, a prvi strojevi za obradu metala bili su upravo kovački strojevi. Iako se kovanje prvenstveno koristi pri obradi na visokim temperaturama, ako se radi o relativno malim dimenzijama obradaka, moguće je obrađivanje i u hladnom stanju (pri sobnoj temperaturi). [4]

Topla deformacija ima prednost u snižavanju potrebnih sila deformiranja i utroška energije (topline) za zagrijavanje, a prilikom toga neizbježno je stvaranje obgora i oksida. Stvaranje oksida nije samo površinsko onečišćenje, već označava i gubitak mase koji se kreće u intervalu od 2 % do 5 %, ovisno o temperaturi i trajanju zagrijavanja, sastavu atmosfere peći te o dimenzijama i obliku materijala koji se zagrijava. Dakle, što je temperatura viša i vrijeme zagrijavanja dulje, to je veća i deblja količina oksida na površini. Osim toga, uvijek postoji mogućnost da oksidi prilikom preoblikovanja budu uvučeni i ukovani dublje ispod površine. Time postaju koncentrirani unutar nekog opterećenog presjeka otkovka i mogu postati uzrokom loma. Iz tog razloga se oksidi redovito skidaju s površine obrađivanog materijala, što je uvjet za dobru kvalitetu otkovka. [4]

Prema načinu provođenja postupka kovanja razlikuju se dva načina:

- 1) slobodno kovanje,
- 2) kovanje u ukovnjima (kalupima za kovanje).



**Slika 7. Pojednostavljeni prikaz razlike slobodnog kovanja i kovanja u ukovnjima [5]**

Oba načina karakterizira to da se od početnog oblika do završnog, gotovog otkovka dolazi postupno, gdje se oblik malo po malo približava konačnom obliku. Razlozi zbog kojih se poduzima postupak kovanja su: postizanje određenog oblika te postizanje određene kvalitete proizvoda kakvu nije moguće postići nekim drugim tehnologijama (koljenasta vratila, ventili, zupčanici, turbinske lopatice). Da bi strojni dijelovi mogli podnositi neugodna dinamička i naizmjenična opterećenja, moraju biti deformirani, a to znači da moraju podnijeti plastični deformaciju kako bi mogli zadovoljiti postavljene uvjete eksploatacije. [4]

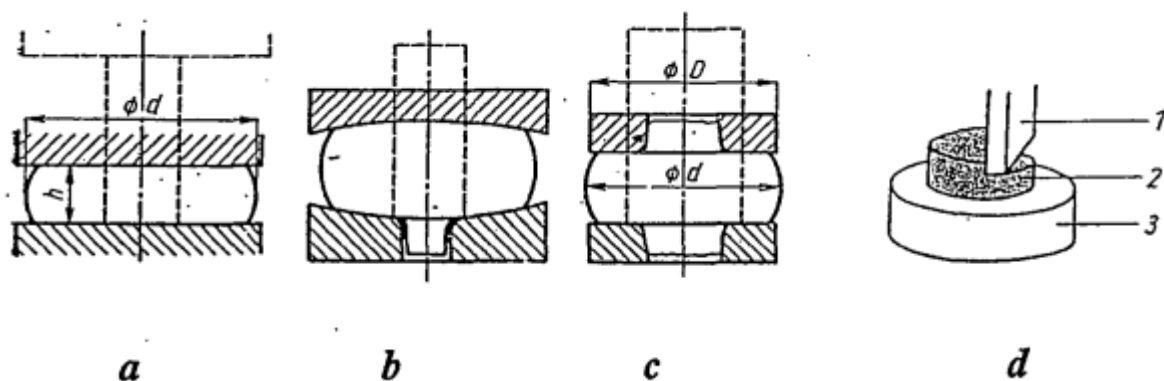
### 3.1. Slobodno kovanje

Slobodno je kovanje najstariji postupak oblikovanja i kao što je već spomenuto, provodi se bez uporabe kalupa. Početni materijal se mijenja tako da ga kalup udara ili pritišće nizom pokreta sve dok se ne postigne traženi oblik. Izradak koji nastane nakon procesa slobodnog kovanja često zahtjeva još dodatnu obradu kako bi se postigle tražene tolerancije mjera, oblika i slično te zahtijevana kvaliteta površine. Slobodno kovanje se najčešće koristi za male serije i jednostavne komade. [5]

Osnovne i najvažnije operacije ovog postupka su sljedeće [4]:

- 1) **Sabijanje** – postupak u kojem postoji redukcija visine u uzdužnom smjeru te slobodno tečenje materijala u vodoravnom smjeru. Zbog trenja se materijal nejednoliko deformira, a time postiže različite iznose tvrdoće. [4]

Ne dolazi do promjene veličine volumena deformiranog materijala, a redovita je i neizbježna pojava bačvanja koja nastaje zbog djelovanja trenja na površinama dodira alata i deformiranog materijala. Djelovanjem kontaktnog trenja slojevi materijala koji se obrađuje uz kontaktne površine otežano teku u odnosu na slojeve dovoljno udaljene od kontaktnih površina. To znači da se nakon izvršene deformacije sabijanjem jasno uočava kontura bačve. Veća sila kontaktnog trenja ujedno otežava i tečenje, a postignuta izrazitija kontura bačvanja ukazuje na veličinu sile kontaktnog trenja. Pojava bačvanja je znak postojanja neravnomjerne deformacije, a samim time i neravnomjernog učinka deformacijskog postupka sabijanja na strukturu i svojstva materijala. [1]



Slika 8. Postupci sabijanja sirovca [1]

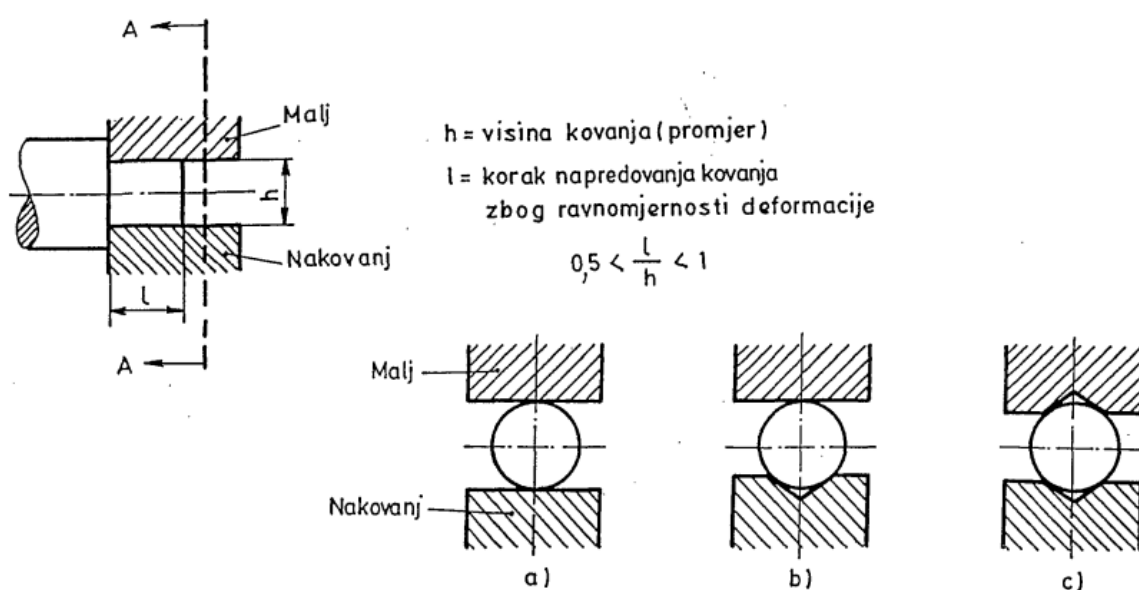
Na slici 8. prikazani su postupci sabijanja različitim oblicima tlačnih ploha kod procesa slobodnog kovanja. Slučaj a) prikazuje sabijanje ravnim plohami malja i nakovnja koji se najčešće izvodi na batovima i kovačkim hidrauličkim prešama. Pod b) je prikazan slučaj sabijanja pomoću zakrivljenih tlačnih ploha s otvorom na plohi nakovnja. Taj otvor služi za izdanak koji se kasnije koristi kao mjesto za prihvat ili manipulaciju tijekom ostalih procesa obrade. Moguće je i sabijanje uz izradu dva izdanka kako je prikazano u slučaju pod c). Slučaj pod d) prikazuje djelomično sabijanje sirovca (2) s maljem prizmatičnog oblika (1) i okruglim nakovnjem (3). Ovaj postupak koristi se u slučajevima kada se ne raspolože s kovačkim strojem dovoljne deformacijske sile ili energije deformacije. [1]

Veličina faktora kontaktnog trenja utječe na intenzitet bačvanja, a ima i direktan utjecaj na veličinu deformacijske sile. S obzirom da se kod realnog sabijanja u toplom stanju temperatura unutar temperaturnog intervala kovanja mijenja, a sabijanje se odvija uz raznolike brzine deformacije, nije moguće s potpunom sigurnosti odrediti točnu vrijednost faktora kontaktnog trenja. Stoga se na temelju brojnih eksperimenata u literaturi mogu pronaći podaci o redu veličine prosječnog faktora kontaktnog trenja koji zadovoljavaju praktične potrebe. [1]



- 2) **Iskivanje i raskivanje** – termin koji primarno označava oblikovanje pri kojem se veličina poprečnog presjeka, odnosno debljina materijala, smanjuje, a samim time duljina povećava. [4]

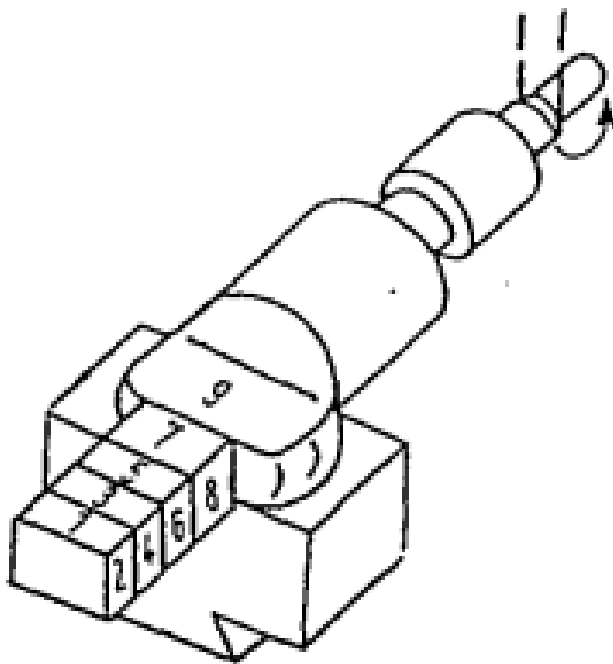
Iskivanje se izvodi učestalim lokalnim sabijanjem u smjeru okomitom na uzdužnu os uz istovremeni posmak kovane mase u smjeru te osi. Postupak iskivanja će, osim produživanja, smanjiti i unutarnje defekte materijala te poboljšati mehanička svojstva u pravcu uzdužne osi. [1]



Slika 9. Shema produživanja iskivanjem [1]

Na slici 9. prikazana je shema produživanja iskivanjem. Postoje tri različita slučaja, odnosno moguća profila radnih površina malja i nakovnja. Pod a) su označene ravne plohe, pod b) je malj u obliku ravne plohe, a nakovanj u obliku slova V, a pod c) obje radne površine oblikovane su s V utorom. Ovaj posljednji slučaj koristi se za teško oblikovljive metale jer se pomoću ploha s utorom može postići veća deformacija. [1]

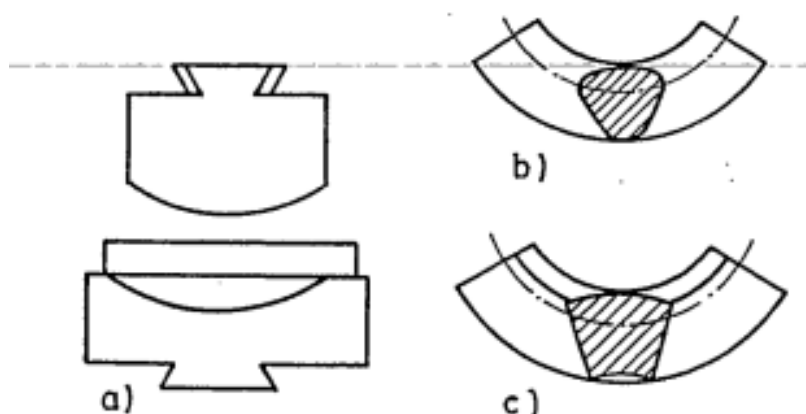
Postupak produživanja iskivanjem prikazan je na slici 10. Raskivanjem, koje je prikazano brojem 9 na slici 10.) kovani se sirovac proširuje i samo djelomično produžuje, a rotacijom kovanog predmeta za  $90^\circ$  i zatim deformacijom, vrši se produživanje. Redoslijed je sljedeći: udarac 1 kojim se materijal raskiva, rotacija za  $90^\circ$  te nakon toga udarac 2, ponovno rotacija za  $90^\circ$ , ali u suprotnom smjeru te udarac 3 (ponovno raskivanje), zatim rotacija u smjeru kao kod udarca 1 pa slijedi udarac 4 i tako dalje sve dok se ne postigne zadana dimenzija. Ovakav način produživanja koristi se kod slobodnog kovanja kratkih otkovaka ili otkovaka sa šupljinom. Za otkovke većih duljina iskivanje se odvija po cijeloj dužini bez okretanja, a tek tada se cijeli otkovak zakrene za  $90^\circ$  i taj postupak se ponavlja dok se ne postigne tražena dužina. [1]



**Slika 10. Postupak produživanja iskivanjem i raskivanjem [1]**

- 3) **Probijanje** – jedna od operacija koja spada u slobodno kovanje i redovito se kosriti kao predoperacija za iskivanje i izduživanje. [4] Ovim postupkom se provodi i oblikovanje i razdvajanje mase otkovka. Obično se probijanje kod slobodnog kovanja velikih masa provodi nakon sabijanja kao neophodna faza izrade prstena ili cjevastih otkovaka. Kod probijanja otvora na otkovcima malih masa, a pogotovo ručno slobodno kovanih, ovaj postupak se koristi za sve oblike otvora – od okruglih, pravokutnih, kvadratnih do šesterokutnih i slično. [1]
- 4) **Zasijecanje** – jedna od operacija slobodnog kovanja te redovito predoperacija iskivanja i izduživanja. [4] Koristi se za izradu prizmatičnih utora u otkovku radi daljnjeg lakšeg odvajanja materijala. [6]
- 5) **Savijanje** – postupak slobodnog kovanja koji omogućuje postizanje zakrivljenosti bez vrijedne promjene presjeka. Obavlja se posebno oblikovanim alatom za točno određeni polumjer zakrivljenosti, a prikazan je na slici 11. pod a). Savijanje se koristi u završnoj fazi izrade različitih savinutih oblika otkovaka (kranske kuke, segmenti vijenaca velikih zupčanika s ozubljenjem, različiti kutnici i sl.) Kod savijanja valja imati u vidu mogući tip deformacije poprečnog presjeka nakon savijanja (skice b) i c) na slici 11.), što ovisi o dimenzijama profila i polumjeru zakrivljenosti. [1]

Valja napomenuti da se prilikom oblikovanja savijanjem na vanjskom dijelu obratka pojavljuju vlačna naprezanja, a na unutarnjem dijelu tlačna naprezanja. [4]

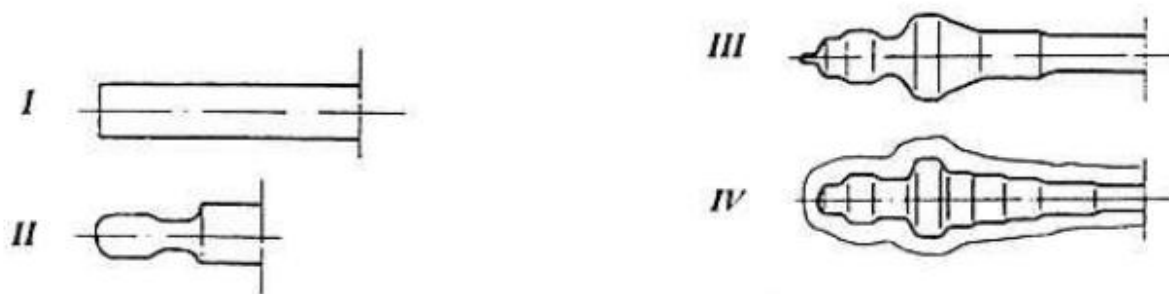


Slika 11. Kovačko savijanje [1]

### 3.2. Kovanje u ukovnju

Kovanje u ukovnju je postupak oblikovanja kod kojeg metal, pod utjecajem udarca malja kovačkog bata ili pod pritiskom preše, ispunjava prostor izrađen u kovačkom alatu, tj. ukovnju. U ovom slučaju je tečenje alata ograničeno zidovima gravure ukovnja, dok kod slobodnog kovanja materijal slobodno teče u pravcima koji su okomiti na pravac pomicanja alata. U današnje vrijeme masovna i serijska proizvodnja raznih otkovaka temelji se na kovanju u ukovnjima, kojima se uz odgovarajuću kvalitetu gotovog izratka postižu i ujednačene dimenzije i oblik. Razlikuju se dva načina kovanja [4]:

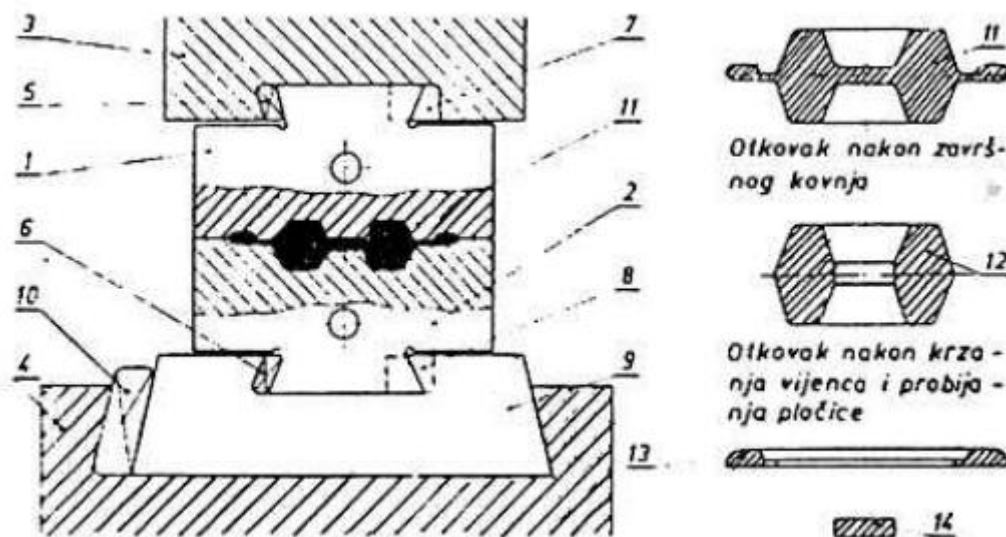
- 1) Pripremno kovanje – poduzima se u pripremnim kovačkim gravurama sa svrhom preraspodjele masa.
- 2) Završno kovanje – stvara se vijenac.



**Slika 12. Postupno oblikovanje osovine različitih poprečnih presjeka [4]**

Oblikovanje završnog oblika u samo jednoj operaciji izvedivo je u rijetkim slučajevima. Polazeći od sirovca do gotovog, završnog oblika dolazi se postupno, u jednoj ili više operacija pripremnog kovanja, kako je prikazano na slici 12. Prilikom svakog tog postupka masa se preraspodjeljuje i oblik se približava onom završnom, koji se na kraju dobiva u gravuri koja na rubu ima kanal za vijenac. Ove se pripremne operacije obično izvode u ukovnju u kojem su sve gravure, uključujući i onu završnu, izvedene u istom kalupu, što omogućuje brži rad i obavljanje cijelog postupka u jednom grijanju. U završnoj operaciji otkovak poprima konačni oblik, a početni volumen malo je veći od volumena konačnog otkovka jer višak materijala istječe u kanal za vijenac koji po opsegu otkovka oblikuje vijenac. Ovaj se višak materijala odstranjuje operacijom odsijecanja. [4]

Na slici 13. prikazan je primjer dvodijelnog ukovnja koji se koristi za kovanje zupčanika na batu. Ispod slike nalazi se i tumač koji označava dijelove.



Slika 13. Dvodijelni ukovanj za kovanje zupčanika na batu [4]

- 1 – gornji ukovanj,
- 2 – donji ukovanj,
- 3 – malj,
- 4 – nakovanj,
- 5, 6 10 – klinovi za pričvršćivanje alata na malj i nakovanj,
- 7, 8 – klinovi za bočno centriranje.

S desne strane gore na slici 13. vidi se skica otkovka nakon završenog kovanja koji još uvijek uokolo ima vijenac te pločicu na sredini, a ispod se nalazi otkovak nakon otkidanja vijenca i probijanja pločice. Kanal za vijenac mora biti tako dimenzioniran da može primiti višak materijala, a da pritom ne bude ispunjen do kraja. Sastoji se od mosta i proširenog dijela kanala, a most ima funkciju otežavanja tečenja materijala kako bi materijal prvo ispunio prostor gravure pa tek onda kad je on u potpunosti ispunjen, materijal otječe u vijenac. Zbog otežanog tečenja potrebno je povećanje sile kovanja, a time i raste naprezanje u deformirajućem materijalu. [4]

### 3.3. Usporedba slobodnog kovanja i kovanja u ukovnju

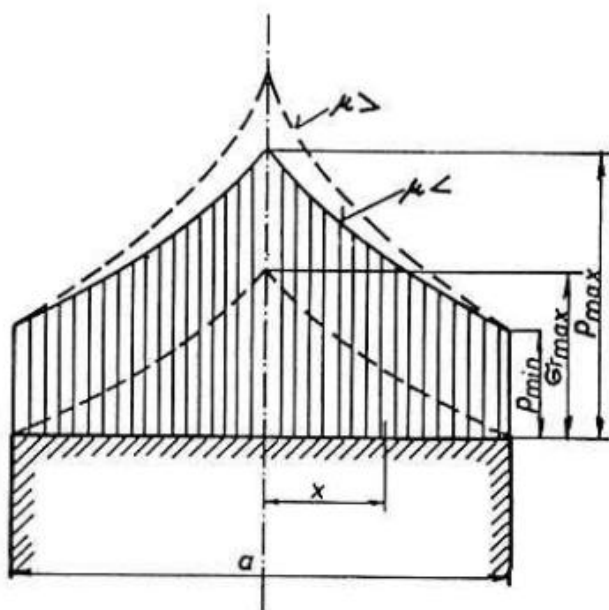
U tablici u nastavku usporedno su prikazana neka svojstva slobodnog kovanja i kovanja u ukovnju. Navedene su temeljne razlike između ta dva postupka te njihove prednosti i nedostatci. [5]

**Tablica 1. Karakteristike slobodnog kovanja i kovanja u ukovnju [5]**

Slobodno kovanje	Kovanje u ukovnju
Prednosti	
Bolja otpornost na zamor materijala te poboljšana mikrostruktura.	Formiranje zrnaste mikrostrukture koja povećava čvrstoću izradaka.
Finija veličina kristalnih zrna.	Ekonomičnost proizvodnje u velikim serijama.
Visoka kvaliteta i dulji vijek trajanja dijelova.	Obradivi gotovo svi materijali.
Manje količine škarta.	Bolja kvaliteta površine.
Smanjenje mogućnosti nastanka šupljina.	Dodatna obrada je rijetko potrebna ili u potpunosti nepotrebna.
Manji troškovi.	Moguće je postići uska tolerancijska polja.
Nedostatci	
Nepogodno za oblikovanje uskih tolerancija i vioskopreciznih dijelova.	Nije ekonomično za male serije zbog izrade kalupa koji su skupi.
Često je potrebna naknadna obrada nakon kovanja.	Nesiguran radni okoliš.

### 3.4. Utjecaj trenja na raspored naprezanja kod slobodnog kovanja pravokutne prizme

U ovom potpoglavlju objasniti će se kako trenje utječe na raspored naprezanja kod slobodnog kovanja pravokutne prizme. Prije svega valja naglasiti da se ovakav postupak promatra kao ravninski, a to znači da je prizma beskonačno duga te da joj se dimenzija duljine ne mijenja. Osim toga, u obzir se uzimaju samo glavna naprezanja, dok se smična zanemaruju, faktor trenja je na svim mjestima jednak, a tangencijalno naprezanje linearno se povećava od sredine prizme prema kontaktnim plohama. [4]



Slika 14. Raspodjela specifičnog pritiska na pravokutnoj prizmi [4]

Na slici 14. grafički je prikazana raspodjela specifičnog pritiska po čelu tlačene pravokutne prizme. Odmah je vidljivo kako je pritisak nejednoliko raspoređen, a maksimalna vrijednost postiže se u sredini, odnosno kuda prolazi simetrala prizme. Provođenjem eksperimenata ova tvrdnja je i dokazana budući da se oštećenja alata događaju oko sredine gdje je prisutan maksimalni pritisak. Osim toga, maksimalan iznos u sredini postiže i radijalno naprezanje. Kod procesa tlačenja potrebno je koristiti mazivo kako bi se taj pritisak i radijalno naprezanje uvelike smanjili, čime se produljuje životni vijek alata. Kada bi se promatrao idealni slučaj u kojem faktor kontaktnog trenja  $\mu$  iznosi nula, odnosno zanemaruje se, specifični pritisak bio bi jednoliko raspoređen po cijeloj površini prizme, a iznosom bi bio jednak naprezanju plastičnog tečenja  $k_f$ . Naprezanje plastičnog tečenja najmanje je naprezanje koje se mora postići kako bi došlo do tečenja materijala i njegove trajne deformacije. Ta činjenica dovodi do zaključka kako je na rubovima prizme specifični pritisak najmanji (jednak naprezanju plastičnog tečenja). Kad bi taj pritisak bio manji, tečenje materijala ne bi bilo moguće, a ako bi bio veći, došlo bi do loma. [4]

## 4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

Eksperimentalni dio ovog završnog projekta proveden je u Laboratoriju za oblikovanje deformiranjem na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Tijekom provođenja eksperimenta bilo je potrebno ispitati kako trenje utječe na silu deformiranja u procesu slobodnog kovanja. Ispitali su se aluminijski uzorci različite hrapavosti površina uz primjenu maziva te bez primjene maziva. Tijekom mjerenja zabilježene su ostvarene sile deformiranja za oba promjenjiva parametra. Rezultati u nastavku prikazani su tablično.

### 4.1. Osnovne informacije prije ispitivanja

Ispitivanje je podijeljeno na dva dijela – u prvom dijelu ispitivalo se devet uzoraka bez maziva, a u drugom dijelu devet uzoraka s mazivom. Tijekom provođenja eksperimenta korišten je isti tarni par čelik – aluminij. Dimenzije uzorka su  $\text{Ø}15,8 \times 24$  mm, a materijal je Al 99,5. Uz to, korištene su i čelične pločice koje imaju hrapavu površinu kako bi se ostvarili potrebni uvjeti za ispitivanje. U prvom dijelu ispitivala se sila deformiranja u tri slučaja: kada su u kontaktu dvije glatke površine, jedna glatka i jedna hrapava površina te dvije hrapave površine. Za svaki odnos površina obavljena su tri mjerenja, što u konačnici daje devet uzoraka. Isti odnos površina korišten je i u drugom dijelu ispitivanja kada se koristilo mazivo, a to također daje devet uzoraka.

Ukupni pomak žiga iznosio je 8 mm, a nakon sabijanja izmjerene su konačne duljine uzoraka i zabilježena je sila deformiranja, koji se kasnije koriste za približan izračun faktora kontaktnog trenja.



Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj preši koja je prikazana na slikama 15. i 16.

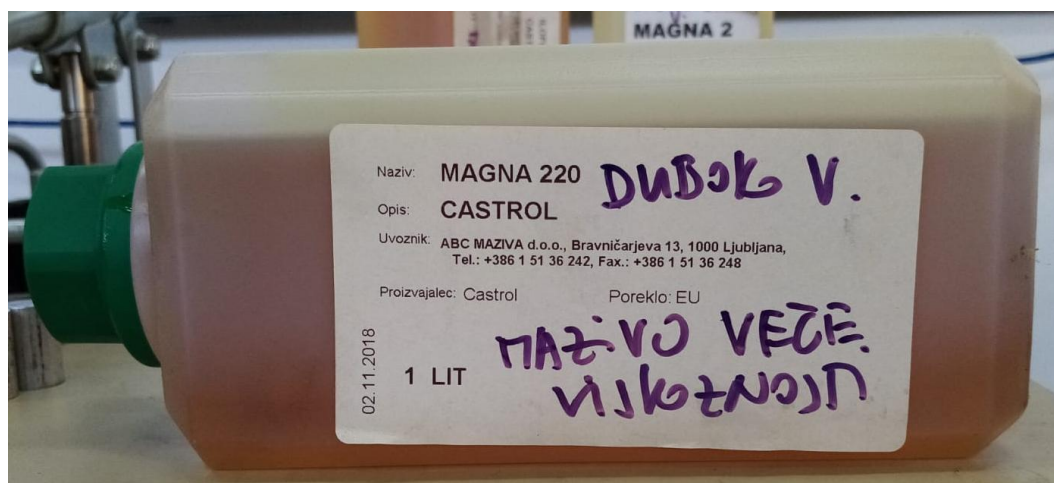


Slika 15. Hidraulička preša (1)



Slika 16. Hidraulička preša (2)

Korišteno mazivo je podmazivajuće ulje Magna 220 – Castrol visoke viskoznosti.



Slika 17. Mazivo Magna 220 – Castrol

Na slici 18. prikazani su uzorci prije deformacije, a u donjem lijevom kutu su čelične pločice velike hrapavosti koje su se koristile kako bi se ostvario odnos površina hrapavo – hrapavo.



Slika 18. Uzorci prije deformacije i čelične pločice

#### 4.2. Proračun faktora kontaktnog trenja

Proračun se provodi prema formuli u nastavku koja je dobivena nakon analize naprezanja na tlačnoj plohi pravokutne prizme.

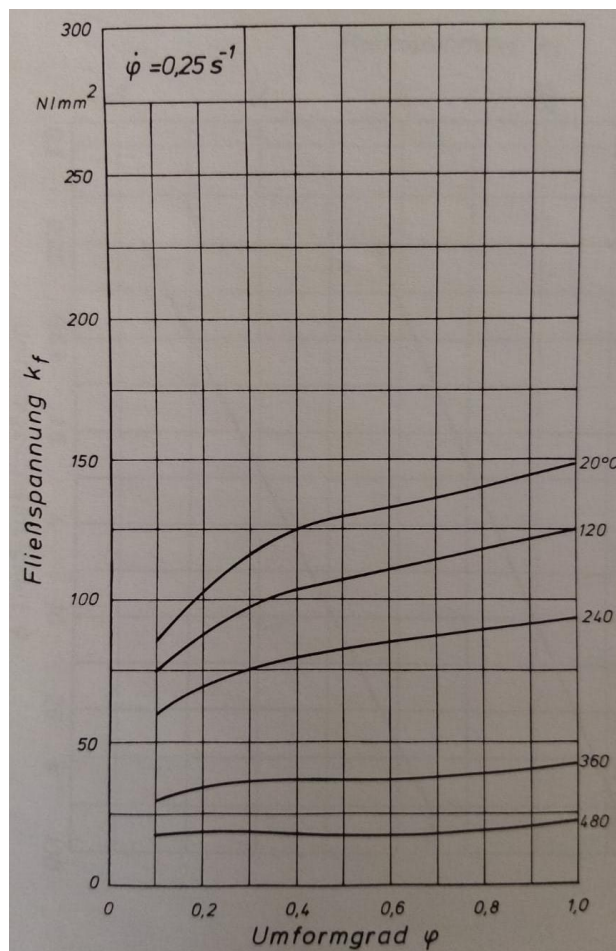
$$F = A \cdot p_{sr} = \frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} \cdot k_f \left( 1 + \frac{\mu d_0}{3h_0} \right)$$

- Gdje je:
- $F$  – sila slobodnog sabijanja, N
  - $A$  – površina na kraju sabijanja, mm<sup>2</sup>
  - $p_{sr}$  – srednji specifični pritisak, N / mm<sup>2</sup>
  - $d_1$  – promjer valjka na kraju deformacije, mm
  - $k_f$  – naprezanje plastičnog tečenja, N / mm<sup>2</sup>
  - $\mu$  – faktor kontaktnog trenja, -
  - $d_0$  – promjer valjka prije deformacije, mm
  - $h_0$  – visina valjka prije deformacije, mm

Za proračun je potrebno izmjerenu silu u eksperimentalnom dijelu pomnožiti s ubrzanjem sile teže koje iznosi  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

Naprezanje plastičnog tečenja  $k_f$ 

Ovaj podatak potreban je za izračun faktora kontaktnog trenja, a za svaki posebni slučaj približna vrijednost očitati će se iz dijagrama na slici 19., za temperaturu od 20 °C. Na apscisi je prikazana vrijednost stupnja deformacije  $\varphi$ , a na ordinati zatim vrijednost koeficijenta plastičnog tečenja.



Slika 19. Graf za izbor koeficijenta  $k_f$  [7]

Logaritamski stupanj deformacije  $\varphi$ 

Dobiva se iz jednadžbe: 
$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1}$$

Gdje je:  $\varphi$  – logaritamski stupanj deformacije, -  
 $h_0$  – visina valjka prije deformacije, mm  
 $h_1$  – visina valjka nakon deformacije, mm

### 4.3. Ispitivanje uzoraka bez maziva

U ovom dijelu napraviti će se analiza utjecaja trenja na silu deformiranja prilikom slobodnog kovanja cilindričnih aluminijskih uzoraka, bez upotrebe maziva. Za svaki navedeni slučaj sparenih kontaktnih površina dana je tablica s osnovnim informacijama o vrijednosti ostvarene sile deformiranja te promjene duljine (visine) uzorka. Uz to napravljen je i proračun za približan iznos faktora kontaktnog trenja kako bi se na kraju mogao donijeti zaključak.

#### 4.3.1. Odnos površina glatko – glatko



Slika 20. Uzorci nakon deformacije gdje su kontaktne površine bile glatke

Tablica 2. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – G, bez maziva

Glatko - glatko			
Uzorak	1	2	3
Početne dimenzije ( $\varnothing d_0 \times h_0$ )	$\varnothing 15,8 \times 24$		
Konačne dimenzije ( $\varnothing d_1 \times h_1$ )	$\varnothing 18,1 \times 16,5$	$\varnothing 18,1 \times 16,6$	$\varnothing 18 \times 16,9$
Deformacijska sila $F$ , N	3430	3350	3360
Faktor trenja $\mu$ , -	0,286	0,265	0,360
Srednja vrijednost $\mu_{sr}$		<b>0,304</b>	
Srednje vrijednost sile sabijanja, $F_{sr}$		<b>3380 N</b>	

Izračun faktora kontaktnog trenja1) Uzorak 1

$$3430 \cdot 9,80665 = \frac{18,1^2 \cdot \pi}{4} \cdot 123 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,286$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,5} = 0,375$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 123 \text{ N} / \text{mm}^2$

2) Uzorak 2

$$3350 \cdot 9,80665 = \frac{18,1^2 \cdot \pi}{4} \cdot 122 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,212$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,6} = 0,369$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 122 \text{ N} / \text{mm}^2$

3) Uzorak 3

$$3360 \cdot 9,80665 = \frac{18^2 \cdot \pi}{4} \cdot 120 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,360$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,9} = 0,351$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 120 \text{ N} / \text{mm}^2$

**Zaključak:**

Kao što je vidljivo na slici 20., tijekom slobodnog sabijanja uzoraka kad su obje kontaktne površine glatke, ne dolazi do izražajne pojave bačvanja uslijed djelovanja trenja. Faktori trenja variraju za svaki uzorak, stoga je izračunat prosječni faktor kontaktnog trenja koji će se kasnije uspoređivati s drugim rezultatima.

### 4.3.2. Odnos površina glatko – hrapavo



Slika 21. Uzorci nakon deformacije gdje su kontaktne površine bile glatko – hrapavo

Napomena: u ovom slučaju površina alata smatra se glatkom, a površina obratka hrapavom.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – H, bez maziva

Glatko - hrapavo			
Uzorak	1	2	3
Početne dimenzije ( $\varnothing d_0 \times h_0$ )	$\varnothing 15,8 \times 24$		
Konačne dimenzije ( $\varnothing d_1 \times h_1$ )	$\varnothing 17,7 \times 16,8$	$\varnothing 17,8 \times 16,9$	$\varnothing 17,8 \times 16,9$
Deformacijska sila $F$ , N	3450	3410	3460
Faktor trenja $\mu$ , -	0,621	0,546	0,621
Srednja vrijednost $\mu_{sr}$		<b>0,596</b>	
Srednja vrijednost sile sabijanja, $F_{sr}$		<b>3440 N</b>	

#### Izračun faktora kontaktnog trenja

##### 1) Uzorak 1

$$3450 \cdot 9,80665 = \frac{17,7^2 \cdot \pi}{4} \cdot 121 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,621$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,8} = 0,357$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 121 \text{ N} / \text{mm}^2$

2) Uzorak 2

$$3410 \cdot 9,80665 = \frac{17,8^2 \cdot \pi}{4} \cdot 120 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,546$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,9} = 0,351$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 120 \text{ N} / \text{mm}^2$

3) Uzorak 3

$$3460 \cdot 9,80665 = \frac{17,8^2 \cdot \pi}{4} \cdot 120 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,621$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,9} = 0,351$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 120 \text{ N} / \text{mm}^2$

**Zaključak:**

Tijekom slobodnog sabijanja uzoraka s hrapavim površinama koje su u kontaktu s glatkim površinama alata, dolazi do blage pojave bačvanja, kako je vidljivo na slici 21. Za razliku od prethodnog slučaja s glatkim površinama, za ovaj odnos površina faktor kontaktnog trenja narastao je za dva puta. To ukazuje na činjenicu da hrapavost površine, a time direktno i trenje, uzrokuje bačvanje cilindričnih uzoraka.

### 4.3.3. Odnos površina hrapavo – hrapavo



**Slika 22. Uzorci nakon deformacije gdje su kontaktne površine bile hrapavo – hrapavo**

Napomena: u ovom slučaju obradak ima hrapave površine, a s gornje i donje strane postavljene su čelične pločice koje također imaju hrapavu površinu.

**Tablica 4. Rezultati ispitivanja odnosa površina H – H, bez maziva**

Hrapavo - hrapavo			
Uzorak	1	2	3
Početne dimenzije ( $\varnothing d_0 \times h_0$ )	$\varnothing 15,8 \times 24$		
Konačne dimenzije ( $\varnothing d_1 \times h_1$ )	$\varnothing 18,3 \times 15,3$	$\varnothing 18 \times 16$	$\varnothing 18 \times 15,9$
Deformacijska sila $F$ , N	3960	3610	3800
Faktor trenja $\mu$ , -	0,741	0,515	0,739
Srednja vrijednost $\mu_{sr}$		<b>0,665</b>	
Srednja vrijednost sile sabijanja, $F_{sr}$		<b>3790 N</b>	

#### Izračun faktora kontaktnog trenja

##### 1) Uzorak 1

$$3960 \cdot 9,80665 = \frac{18,3^2 \cdot \pi}{4} \cdot 127 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,741$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{15,3} = 0,450$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 127 \text{ N} / \text{mm}^2$



2) Uzorak 2

$$3610 \cdot 9,80665 = \frac{18^2 \cdot \pi}{4} \cdot 125 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,515$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16} = 0,405$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 125 \text{ N} / \text{mm}^2$

3) Uzorak 3

$$3800 \cdot 9,80665 = \frac{18^2 \cdot \pi}{4} \cdot 126 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,739$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{15,9} = 0,412$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 126 \text{ N} / \text{mm}^2$

**Zaključak:**

Na slici 22. prikazani su uzorci nakon slobodnog sabijanja i može se vidjeti kako je u ovom slučaju pojava bačvanja najizraženija. Zbog hrapavih površina alata i hrapavih površina uzoraka, tečenje materijala u blizini kontakta tih površina jako je otežano, što dovodi do pojave ovakvog oblika obradaka. Faktor trenja je u ovom slučaju najveći, a to odgovara pretpostavci da je trenje na hrapavim površinama veće.

#### 4.4. Ispitivanje uzoraka s mazivom

U ovom dijelu napraviti će se analiza utjecaja trenja na silu deformiranja prilikom slobodnog kovanja cilindričnih aluminijskih uzoraka, ali s upotrebom maziva između kontaktnih površina. I u ovom dijelu je za svaki navedeni slučaj sparenih kontaktnih površina dana tablica s osnovnim informacijama o vrijednosti ostvarene sile deformiranja te promjene duljine (visine) uzorka. Napravljen je i proračun za približan iznos faktora kontaktnog trenja kako bi se na kraju mogao donijeti zaključak.

##### 4.4.1. Odnos površina glatko – glatko



Slika 23. Uzorci nakon deformacije gdje su kontaktne površine bile glatke

Tablica 5. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – G, s mazivom

Glatko - glatko			
Uzorak	1	2	3
Početne dimenzije ( $\varnothing d_0 \times h_0$ )	$\varnothing 15,8 \times 24$		
Konačne dimenzije ( $\varnothing d_1 \times h_1$ )	$\varnothing 18,2 \times 16,8$	$\varnothing 18,6 \times 16,7$	$\varnothing 18 \times 16,8$
Deformacijska sila $F$ , N	3460	3470	3260
Faktor trenja $\mu$ , -	0,355	0,160	0,174
Srednja vrijednost $\mu_{sr}$		<b>0,230</b>	
Srednja vrijednost sile sabijanja, $F_{sr}$		<b>3396,7 N</b>	

Izračun faktora kontaktnog trenja1) Uzorak 1

$$3460 \cdot 9,80665 = \frac{18,2^2 \cdot \pi}{4} \cdot 121 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,355$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,8} = 0,357$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 121 \text{ N / mm}^2$

2) Uzorak 2

$$3470 \cdot 9,80665 = \frac{18,5^2 \cdot \pi}{4} \cdot 121 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,211$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,7} = 0,363$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 121 \text{ N / mm}^2$

3) Uzorak 3

$$3260 \cdot 9,80665 = \frac{18^2 \cdot \pi}{4} \cdot 121 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,174$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,8} = 0,357$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 121 \text{ N / mm}^2$

**Zaključak:**

Kao što je vidljivo na slici 23., tijekom slobodnog sabijanja uzoraka kad su obje kontaktne površine glatke i koristi se mazivo, također ne dolazi do izražajne pojave bačvanja. Tečenje materijala u blizini kontaktnih površina je olakšano zbog upotrebe maziva pa je zbog toga i faktor trenja manji.

#### 4.4.2. Odnos površina glatko – hrapavo



Slika 24. Uzorci nakon deformacije gdje su kontaktne površine bile glatko – hrapavo

Napomena: u ovom slučaju obradak ima hrapave površine koje su u kontaktu s glatkom površinom alata.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja odnosa površina G – H, s mazivom

Glatko - hrapavo			
Uzorak	1	2	3
Početne dimenzije ( $\varnothing d_0 \times h_0$ )	$\varnothing 15,8 \times 24$		
Konačne dimenzije ( $\varnothing d_1 \times h_1$ )	$\varnothing 18,3 \times 16,8$	$\varnothing 18,6 \times 17$	$\varnothing 18,4 \times 16,8$
Deformacijska sila $F$ , N	3550	3440	3390
Faktor trenja $\mu$ , -	0,428	0,158	0,152
Srednja vrijednost $\mu_{sr}$		<b>0,246</b>	
Srednja vrijednost sile sabijanja, $F_{sr}$		<b>3460 N</b>	

Izračun faktora kontaktnog trenja

1) Uzorak 1

$$3550 \cdot 9,80665 = \frac{18,3^2 \cdot \pi}{4} \cdot 121 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,428$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,8} = 0,357$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 121 \text{ N} / \text{mm}^2$

2) Uzorak 2

$$3440 \cdot 9,80665 = \frac{18,6^2 \cdot \pi}{4} \cdot 120 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,158$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{17} = 0,345$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 120 \text{ N} / \text{mm}^2$

3) Uzorak 3

$$3390 \cdot 9,80665 = \frac{18,4^2 \cdot \pi}{4} \cdot 121 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,152$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,8} = 0,357$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 121 \text{ N} / \text{mm}^2$

**Zaključak:**

Kod slobodnog sabijanja uzoraka s hrapavim površinama koje su u kontaktu s glatkim površinama alata, dolazi do blage pojave bačvanja u odnosu na slučaj kad su u kontaktu samo glatke površine (slika 24.). Također, faktor trenja za ovaj slučaj malo je veći zbog hrapavosti površina obratka.

#### 4.4.3. Odnos površina hrapavo – hrapavo



**Slika 25.** Uzorci nakon deformacije gdje su kontaktne površine bile hrapavo – hrapavo

Napomena: za ovo ispitivanje također su se čelične pločice postavile s gornje i donje strane uzoraka, a obje kontaktne površine bile su hrapave.

**Tablica 7.** Rezultati ispitivanja odnosa površina H – H, s mazivom

Hrapavo – hrapavo			
Uzorak	1	2	3
Početne dimenzije ( $\varnothing d_0 \times h_0$ )	$\varnothing 15,8 \times 24$		
Konačne dimenzije ( $\varnothing d_1 \times h_1$ )	$\varnothing 18 \times 16,1$	$\varnothing 18,2 \times 15,9$	$\varnothing 18,1 \times 16,1$
Deformacijska sila $F$ , N	3460	3670	3790
Faktor trenja $\mu$ , -	0,304	0,446	0,709
Srednja vrijednost $\mu_{sr}$		<b>0,486</b>	
Srednja vrijednost sile sabijanja, $F_{sr}$		<b>3640 N</b>	

#### Izračun faktora kontaktnog trenja

##### 1) Uzorak 1

$$3460 \cdot 9,80665 = \frac{17,6^2 \cdot \pi}{4} \cdot 125 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,528$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,1} = 0,399$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 125 \text{ N} / \text{mm}^2$

2) Uzorak 2

$$3670 \cdot 9,80665 = \frac{18,2^2 \cdot \pi}{4} \cdot 126 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,446$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{15,9} = 0,412$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 126 \text{ N} / \text{mm}^2$

3) Uzorak 3

$$3790 \cdot 9,80665 = \frac{18,1^2 \cdot \pi}{4} \cdot 125 \left( 1 + \frac{\mu \cdot 15,8}{3 \cdot 24} \right) \rightarrow \mu = 0,709$$

Logaritamski stupanj deformacije:  $\varphi = \ln \frac{h_0}{h_1} = \ln \frac{24}{16,1} = 0,399$

Očitano naprezanje plastičnog tečenja:  $k_f = 125 \text{ N} / \text{mm}^2$

**Zaključak:**

Na slici 25. prikazani su uzorci nakon deformacije te se u ovom slučaju (s korištenjem maziva) vidi najizraženija pojava bačvanja. Kao što je već spomenuto, zbog kontakta hrapavih površina otežano je tečenje materijala, ali u blažoj mjeri budući da se koristilo mazivo.

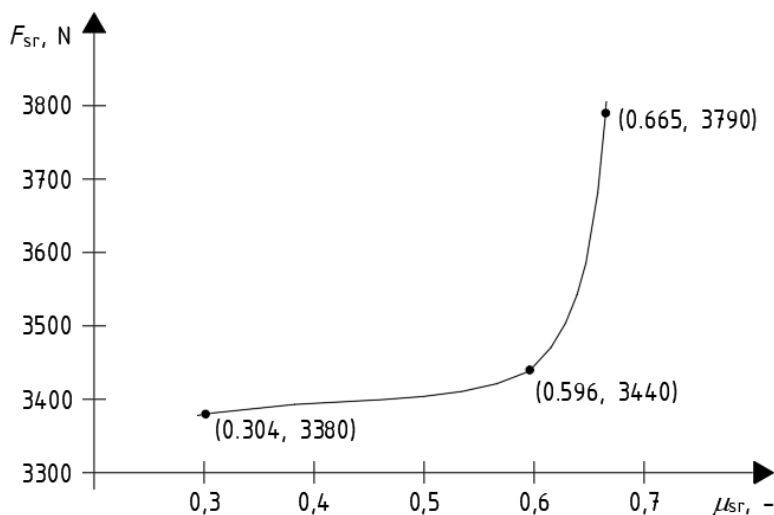
#### 4.5. Usporedba sila sabijanja

U tablici 8. u nastavku usporedno su napisani rezultati ispitivanja. Vidljivo je da se za oba slučaja (korištenje i ne korištenje maziva) najveća deformacijska sila ostvaruje tamo gdje je i iznos kontaktnog trenja među površinama najveći. Slično tome, najmanja sila trenja ostvaruje se tamo gdje je faktor kontaktnog trenja najmanji.

**Tablica 8. Usporedba srednjih vrijednosti sila i koeficijenata trenja**

	Bez maziva		S mazivom	
	$\mu_{sr}$ , -	$F_{sr}$ , N	$\mu_{sr}$ , -	$F_{sr}$ , N
G – G	0,304	3380	0,230	3396,7
G – H	0,596	3440	0,246	3460
H – H	<b>0,665</b>	<b>3790</b>	<b>0,486</b>	<b>3640</b>

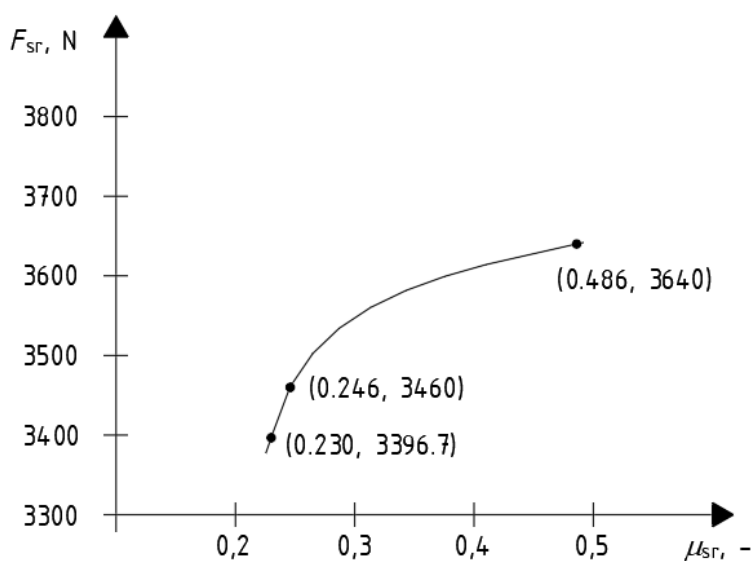
##### 4.5.1. Ovisnost sile sabijanja o faktoru kontaktnog trenja



**Slika 26. Ovisnost sile sabijanja o faktoru trenja, bez maziva**

Na slici 26. nalazi se graf ovisnosti srednje sile sabijanja o srednjem faktoru trenja za svaki od tri različita slučaja kontaktnih površina, bez upotrebe maziva. Vidljivo je da s porastom faktora trenja raste i sila sabijanja. U početku se vidi blagi porast, a s većim faktorom trenja dolazi do naglog porasta sile sabijanja.





Slika 27. Ovisnost sile sabijanja o faktoru trenja, s mazivom

Na slici 27. prikazan je graf ovisnosti srednje sile sabijanja o srednjem faktoru trenja za svaki od tri različita slučaja kontaktnih površina, ali s dodatkom maziva. Vidljivo je kako i u ovoj situaciji sila sabijanja raste s porastom faktora trenja – u početku je rast veći, dok s povećanjem faktora trenja rast sile ima manji iznos.

## 5. ZAKLJUČAK

Kovanje je danas jedan od najzastupljenijih postupaka oblikovanja metala deformiranjem. Zbog svoje široke primjenjivosti može se koristiti za maloserijsku ili velikoserijsku proizvodnju, za jednostavne ili komplicirane otkovke. Kao i kod svakog postupka oblikovanja deformiranjem, na kontaktu dviju površina javlja se trenje koje je u ovom slučaju nepoželjno. Zbog trenja dolazi do slabog tečenja materijala uz kontaktne površine i, u slučaju slobodnog sabijanja cilindričnih uzoraka, do pojave bačvanja. Upravo taj problem promatran je u ovom radu. Provedeno je ispitivanje u kojem se cilindrični uzorci slobodno sabijaju bez prisustva maziva i s korištenjem maziva između kontaktnih površina. Na temelju prikupljenih podataka donesen je zaključak kako je sila trenja uvijek prisutna i ne može se ostvariti idealni slučaj u kojem trenje ne postoji. Uporabom maziva i obradom površine može se značajno utjecati na trenje, a smanjenjem trenja utječe se i na smanjenje ukupne deformacijske sile. U konačnici, to smanjenje trenja i ukupne deformacijske sile znači da je alat manje opterećen čime mu se automatski produljuje životni vijek.

## LITERATURA

- [1] „Tehnologija oblikovanja metala deformiranjem, Slobodno kovanje čelika“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2005., [https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/Slobodno\\_kovanje\\_celika.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/Slobodno_kovanje_celika.pdf)
- [2] L. Pavličić, "Eksperimentalno i numeričko određivanje faktora trenja u postupcima oblikovanja deformiranjem", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:437990>
- [3] D. Ivičić, "Procedure ispitivanja trenja i regulacija računalom vođenog tribometra", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:320541>
- [4] M. Math, „Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1999.
- [5] CFS FORGE, <http://www.steelforging.org/open-die-forging-vs-closed-die-forging/>, pristupljeno: veljača 2022.
- [6] Kovanje, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kovanje>, pristupljeno: veljača 2022.
- [7] E. Doege, H. Meyer – Nolkemper, I. Saeed, „Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe“, Hanser Verlag München Wien