Eksperimentalno i numeričko određivanje faktora trenja u postupcima oblikovanja deformiranjem

Pavličić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:235:437990

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Pavličić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Zdenka Keran, dipl. ing.

Student:

Luka Pavličić

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentorici Dr.sc. Zdenki Keran, dipl. ing. na stručnoj pomoći i ustupljenom vremenu tijekom izrade ovoga rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i kolegama koji su mi pružili veliku potporu tijekom studiranja bez kojih moje obrazovanje ne bi bilo moguće.

Luka Pavličić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite 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:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Pavličić** Mat. br.: 0035185770

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksperimentalno i numeričko određivanje faktora trenja u postupcima oblikovanja deformiranjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experimental and Numerical Determination of Friction Coefficient in Metal Forming Processes**

Opis zadatka:

U većini postupaka oblikovanja metala deformiranjem postojanje kontaktnog trenja ima neželjene posljedice. Kako bi se u proizvodnji metalnih izradaka što efikasnije rješavao problem trenja, potrebno je poznavati veličinu faktora trenja. Dva su pristupa uobičajena u istraživanjima veličine faktora trenja: prvi je njegovo izračunavanje iz poznatog izraza za deformacijsku silu nakon što su ostale veličine poznate, a sila određena pokusom, a drugi je eksperimentalni način mjerenja veličine faktora trenja u određenom, najčešće modelnom, postupku oblikovanja. Eksperimentalnim načinom dobiva se rezultat koji vrijedi u specifičnim uvjetima i predstavlja prosječnu veličinu faktora trenja u provedenom eksperimentu. Ovim se načinom može odrediti iznos faktora trenja prije izvođenja konkretnog tehnološkog procesa, te je on u praksi korisniji.
Budući da se većina postupaka oblikovanja metala deformiranjem zasniva na djelovanju tlačnog naprezanja, u radu je potrebno istražiti upotrebu najčešće metode eksperimentalnog određivanja faktora trenja pri djelovanju tlačnog naprezanja, Burgdorffove metode. Potrebno je provesti eksperiment sabijanja standardiziranih prstenova, izvršiti pripadajuća mjerenja promjene dimenzija sabijanih prstenova i rezultate prikazati kalibracijskim dijagramom. Eksperimentalne rezultate potrebno je testirati nekim od komercijalnih programskih paketa za numeričku simulaciju plastične deformacije metala te napraviti usporedbu eksperimentalnih i numerički dobivenih rezultata.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: 28. rujna 2017.

Datum predaje rada: 30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane: 6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao: Doc. dr. sc. Zdenka Keran

Predsjednica Povjerenstva: Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. TRENJE 2
2.1. Vrste trenja 3
2.1.1. Statičko trenje 4
2.1.2. Granično trenje 5
2.1.3. Mješovito trenje 5
2.1.4. Tekuće trenje 6
2.2. Sila trenja 7
2.2.1. Priroda nastanka sile trenja 7
2.3. Faktor trenja 8
2.4. Trenje u strojarstvu 8
3. TRENJE PRI OBLIKOVANJU DEFORMIRANJEM 10
3.1. Teorijske osnove trenja kod oblikovanja deformiranjem 11
3.2. Utjecaj pojedinih faktora na proces trenja u uvjetima oblikovanja metala deformiranjem 12
3.3. Deformacijski strojevi 13
3.3.1. Strojevi sa zagarantiranom silom 14
3.3.1.1. Hidraulične preše 15
3.4. Tehnološka maziva 18
3.4.1. Osnovna fizikalna i kemijska svojstva mazivih tvar 19
3.4.2. Podjela prema agregatnom stanju 19
3.5. Utjecaj trenja na provedbu tehničkih procesa 21
3.6. Coulombov zakon trenja 23
3.7. Određivanje faktora trenja 24
3.7.1. Metoda sabijanja prstena 24
4. EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKO ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA FAKTORA TRENJA μ 28
4.1. Postupak rada u programu MSC.Marc Mentat 28
4.1.1. Pokretanje programa 28
4.1.2. Konstruiranje sirovca 29
4.1.3. Mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti 30
4.1.4. Određivanje svojstava materijala 31
4.1.5. Definiranje kontakata između tijela 33
4.1.6. Slučajevi opterećenja 35
4.1.7. Pokretanje simulacije 37

4.2. Rezultati dobiveni simulacijskim programom MSC Marc Mentat 39
4.2.1. Tablični prikaz rezultata 40
4.2.2. Grafički prikaz rezultata 41
4.3. Eksperimentalno određivanje faktora trenja 42
4.3.1. Provedba procesa u laboratoriju 42
4.3.2. Rezultati dobiveni eksperimentalnim određivanjem 45
4.3.2.1. Tablični prikaz rezultata 46
4.3.2.2. Grafički prikaz rezultata 47
4.4. Usporedba rezultata 49
5. ZAKLJUČAK 51
LITERATURA 52
PRILOZI 53

POPIS SLIKA

Slika 1. Trenje na vodoravnoj površini 2
Slika 2. Ovisnost sile trenja o relativnoj brzini 3
Slika 3. Aproksimacija dodirne površine dvaju tijela pomoću niza opruga u režimu statičkog trenja 4
Slika 4. Model graničnog trenja 5
Slika 5. Shema miješanog trenja u toku deformacijskog postupka 6
Slika 6. Trenja na horizontalnoj površini 7
Slika 7. Mikroskopski pogled na dodirnu povšinu dvaju tijela 7
Slika 8. Kočenje automobila 8
Slika 9. Širenje pukotina u kompozitu 9
Slika 10. Deformiranje komada pri plastičnoj deformaciji 11
Slika 11. Shema podjele strojeva s pravocrtnim gibanjem alata 14
Slika 12. Hidraulična preša (shematski i ograničenje sile) 15
Slika 13. Približni radni ciklus hidraulične preše a) dijagram hoda alata, b) dijagram brzine alata 17
Slika 14. Primjer adhezije i kohezije za različite tvari 19
Slika 15. Prstenasta epruveta 25
Slika 16. Prstenasta epruveta nakon deformiranja 25
Slika 17. Kalibracijski dijagram za određivanje faktora trenja prema Burgdorffu 26
Slika 18. Početna stranica programa 28
Slika 19. Pozicioniranje prve točke 29
Slika 20. Radni komad 30
Slika 21. Mreža konačnih elemnata 31
Slika 22. Prikaz krivulje nakon unesenih točaka 32
Slika 23. Definiranje malja, nakovnja i sirovca 33
Slika 24. Gibanje malja 34
Slika 25. Odabir željenih prikaza nakon simulacije 37
Slika 26. Ispitna epruveta prije i nakon tlačenja 38
Slika 27. Primjer mjerenja prstena 39
Slika 28. Kalibracijski dijagram dobiven rezultatima simulacija 41
Slika 29. Hidraulička preša 42
Slika 30. Proces sabijanja ispitnog prstena 44
Slika 31. Ispitni prstenovi nakon tlačenja 45
Slika 32. Pomično mjerilo korišteno za mjerenje stlačenih prstenova 45
Slika 33. Dijagram sa rezultatima dobivenim mjerenjem 47
Slika 34. Aproksimacija dobivenih rezultata 48
Slika 35. Usporedba dijagrama i određivanje koeficijenta faktora trenja 49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri strojarskih elemenata s poželjnim i nepoželjnim trenjem 9
Tablica 2. Faktori koji utječu na izbor čvrstog maziva 21
Tablica 3. Uloga trenja kod procesa oblikovanja deformiranjem 22
Tablica 4. Faktor trenja u zadanim uvjetima 22
Tablica 5. Faktor trenja kod valjanja pri zahvatu metala valjcima i pri ustaljenom procesu valjanja 23
Tablica 6. Karakteristične vrijednosti za materijal Al 99.5 31
Tablica 7. Tablica vrijeme/brzina za slučaj tlačenja ispitnog valjčića 34
Tablica 8. Rezultati dobiveni simulacijama 40
Tablica 9. Potreban tlak da bi se ostvarila željena veličina sile 43
Tablica 10. Rezultati dobiveni mjerenjem nakon procesa tlačenja u laboratoriju 46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	Aktivna sila
G	N	Težina
N	N	Normalna sila
F_t	N	Sila trenja
F_v	N	Vučna sila
F_N	N	Nazivna sila
F_p	N	Sila koja djeluje na vodilicu hidraulične preše
p	N/mm^2	Tlak koji djeluje na površinu klipa
A	m^2	Površina klipa
P	W	Snaga hidraulične preše
V	m^3/s	Volumetrički protok fluida
p_h	N/mm^2	Hidrostatski tlak
η	-	Mehanički i električki gubici
d_{u0}	mm	Unutarnji promjer prije deformacije
d_{v0}	mm	Vanjski promjer prije deformacije
h_0	mm	Visina prstena prije deformacije
h_1	mm	Visina prstena
d_{u1}	mm	Srednja vrijednost unutarnjeg promjera
d_{u1}'	mm	Minimalni unutarnji promjer
d_{u1}''	mm	Maksimalni unutarnji promjer
d_{v1}	mm	Srednja vrijednost vanjskog promjera
d_{v1}'	mm	Minimalni vanjski promjer
d_{v1}''	mm	Maksimalni vanjski promjer
φ	-	Logaritamski stupanj deformacije
k_f	N/mm^2	Naprezanje plastičnog tečenja
t	s	Vrijeme
v	mm/s	Brzina gibanja malja
z	Mpa	Sposobnost tečenja
S	mm^2	Površina klizanja
h	mm	Debljina sloja maziva

SAŽETAK

Tijekom rada pojašnjeno je djelovanje trenja u raznim tehnološkim procesima oblikovanja deformiranjem, te utjecaj trenja na pojedini proces, bio on poželjan ili nepoželjan.

Kako trenje svakodnevno susrećemo, često trošimo energiju kako bi svladali njegovo djelovanje. Trenje u strojarstvu, odnosno u raznim proizvodnim procesima može imati štetan učinak, ali isto tako može znatno pridonijeti lakšoj i učinkovitoj provedbi nekog procesa. Vrlo važno je poznavati veličinu, odnosno iznos koeficijenta trenja. Poznavanje vrijednosti koeficijenta trenja omogućava lakše vođenje pojedinih procesa. Vrijednost koeficijenta trenja ovisi o materijalima koji su u dodiru, te o kvaliteti, odnosno hrapavosti dodirnih ploha. Prilikom oblikovanja metala deformiranjem, trenje se javlja u obliku kontaktnog trenja, a definira se kao otpor koji pružaju dva tijela u međusobnom kontaktu. Kao takvo narušava kvalitetu obrađivane površine, te uzrokuje oštećenja na alatu.

Utjecaj trenja na sam proces može se smanjiti korištenjem raznih mazivih sredstava, čime se mogu smanjiti neželjene posljedice. Najčešće korištena mazivna sredstva su: mineralna maziva ulja, mazive masti, te čvrsta maziva. Odabir mazivnog sredstva ovisi o: vrsti procesa, temperaturi, te o materijalima koji se obrađuju.

Određivanje vrijednosti faktora trenja moguće je iz poznatog izraza za deformacijsku silu ili eksperimentalnim načinom koji je detaljnije obrađen u samom radu.

SUMMARY

In this thesis the friction effect that occurs during the different metal forming processes is clarified, as well as the friction influence on each single process, regardless of the friction desirability.

Since the friction is met on daily basis, an additional energy is often spent to overcome it. Friction in mechanical engineering, i.e. in different production processes has a harmful effect, but it could also significantly contribute to easier and more efficient implementation of the process. It is of great importance to know the amount of the friction coefficient. By knowing the amount of friction coefficient, easier process management is enabled. The value of the friciton coefficient depends on type of the materials that are in mutual contact, as well as on the roughness of the surfaces that are in mutual contact. During the metal forming process, friction occurs in the form of contact friction and is defined as the resistance that results from two bodies in mutual contact. As such a phenomenon it damages the quality of treated surface and causes the tool damage.

Influence of the friction on the process can be reduced by using various lubricants, thus reducing unwanted consequences. The most commonly used lubricants are: mineral lubricating oil, grease and solid lubricants.

Determination the friction factor value is possible by using the deformation force expression or via experiment which is described in this thesis.

1. UVOD

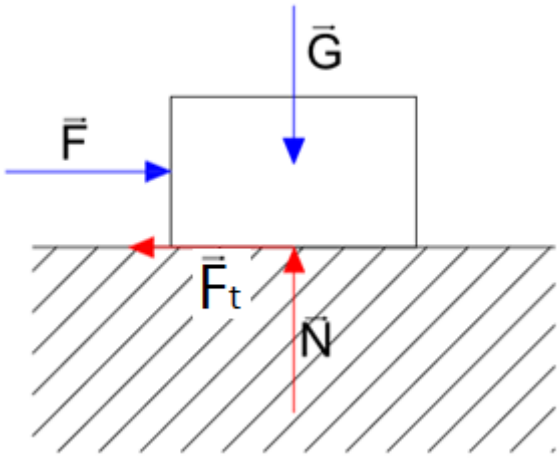
Pojava kontaktnog trenja u većini postupaka oblikovanja ima neželjene posljedice pri deformiranju metala. Kao takvo, uzrokuje nejednoliko tečenje metala i zaostala naprezanja. Naprezanje narušava kvalitetu i izgled površine, te smanjuje vijek trajanja alata. Kao dokaz da prilikom postupka djeluje vanjsko kontaktno trenje, vidljiva su oštećenja alata, te je mjerenjima moguće uočiti različite tvrdoće u uzdužnom presjeku tlačenog obratka. Kako bi se prilikom postupaka što jednostavnije rješavao problem postojanja trenja potrebno je poznavati vrijednost faktora trenja.

Postoji nekoliko načina dobivanja vrijednosti faktora trenja. Vrijednost faktora trenja možemo odrediti indirektno izračunavanjem iz poznatog izraza za deformacijsku silu, te eksperimentalnim načinom, čiji rezultati vrijede samo ako se postupak odvija u istim uvjetima u kojima je proveden i sam eksperiment (korišteno isto mazivno sredstvo, jednaka sila, te jednaki vanjski uvjeti). Eksperimentalnim načinom moguće je odrediti iznos faktora trenja prije samoga izvođenja tehnološkoga procesa.

Korištenjem mazivnih sredstava u procesima oblikovanja deformiranjem može se utjecati na učinak trenja, odnosno, mogu se smanjiti njegove neželjene posljedice. Više je različitih vrsta maziva koja se mogu upotrebljavati u procesima, a neki od najčešćih su: mineralna ulja, dispergirani grafit, otopine masti i ulja, polimeri i vosak. Koje mazivno sredstvo najbolje upotrijebiti ovisi o više faktora, kao npr. tipu procesa oblikovanja, temperaturi na kojoj se proces odvija, te o materijalima koji se obrađuju.

2. TRENJE

Trenje se definira kao otpor koji se javlja između površina nalijeganja dvaju tijela i suprotstavlja se međusobnom gibanju, bilo klizanjem, ili kotrljanjem i valjanjem (trenje gibanja - kinetičko trenje), ili onemogućavanju gibanja (trenje mirovanja - statičko trenje). To nije fundamentalna sila, jer je čine elektromagnetske sile između atoma. Kada se površine koje su u kontaktu kreću relativno u suprotnim smjerovima, imaju trenje između ta dva objekta koje pretvara kinetičku energiju u termalnu energiju, tj. u toplotu. Ona je direktno ovisna o okomitoj sili na površinu tijela koja se naziva normalna sila ili sila pritiskanja na površinu i o koeficijentu trenja koji ovisi o stanju površine (hrapavosti) i o sparenim materijalima dvaju tijela u dodiru. Normalna sila najčešće je težina tijela, ako je podloga horizontalna i nema dodatne sile pritiska izvana, a ako se radi o kosoj podlozi onda je normalna sila okomiti dio gravitacijske sile na površinu [1].



Slika 1. Trenje na vodoravnoj površini

Gdje je:

F – aktivna sila, N

G – težina, N

F_t – sila trenja, N

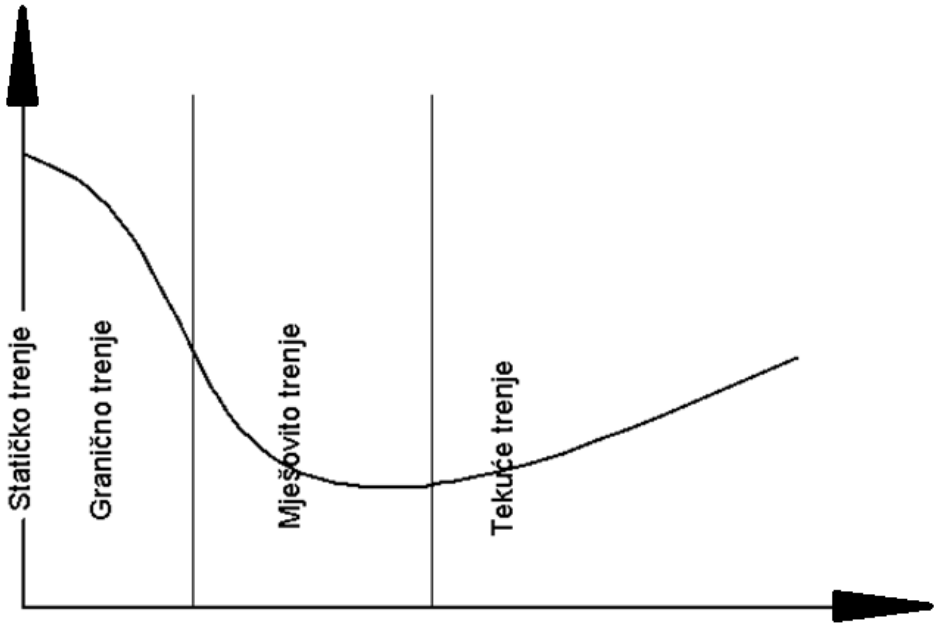
N – normalna sila, N

2.1. Vrste trenja

Pod djelovanjem tangencijalne sile izvana narinute, dolazi do smicanja asperitnih veza što rezultira njihovim elastičnim i plastičnim deformacijama.

Asperitne veze definiraju se kao veze između dva tijela za vrijeme mirovanja, pucanjem tih veza dolazi do gibanja jednog materijala. Mehanizam stvaranja sile trenja tipično se može promatrati u četiri područja, odnosno režima, ovisno o iznosu relativne brzine [1] (slika 2):

- statičko trenje
- granično trenje
- mješovito trenje
- tekuće trenje

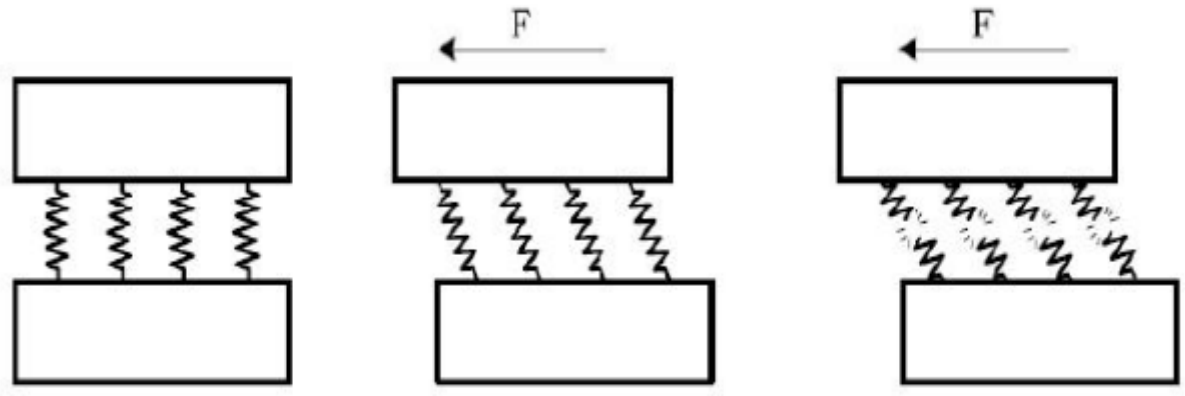


Slika 2. Ovisnost sile trenja o relativnoj brzini [1]

2.1.1. Statičko trenje

Statičko trenje podrazumijeva da ne postoji relativno gibanje, te stoga postoji izravan kontakt između dodirnih površina. Sa stajališta upravljanja, bitna karakteristika asperitnih veza je njihovo elastično savijanje. Ako je nametnuta sila manja od čvrstoće asperitnih veza, sustav se ponaša kao da je između dodirne površine umetnuto niz opruga velike krutosti [1] (slika 3).

Polagana plastična deformacija asperitnih vlakana, druga je bitna karakteristika statičkog trenja. Kao posljedica polagane plastične deformacije kontaktna se površina među asperitima povećava s povećanjem vremena provedenog u mirovanju. Povećanje površine asperitnih veza rezultira većom čvrstoćom samih veza. Zatim slijedi da će sila potrebna za razaranje asperitnih veza, odnosno pokretanje tijela, biti tim veća što su dodirne površine više vremena provele u mirovanju [1].

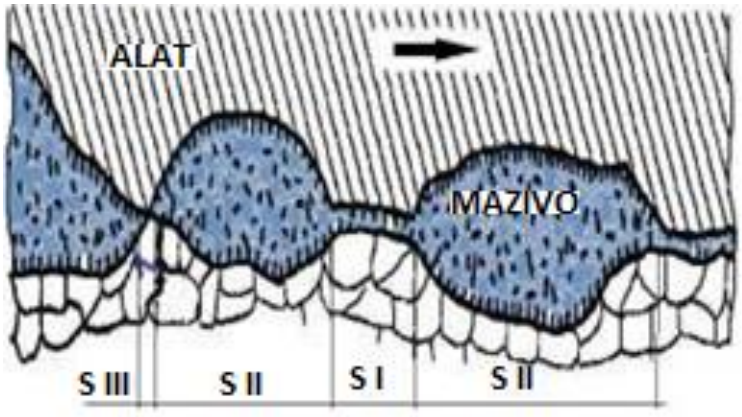


Slika 3. Aproksimacija dodirne površine dvaju tijela pomoću niza opruga u režimu statičkog trenja [1]

2.1.2. Granično trenje

U režimu graničnog trenja dolazi do relativnog gibanja, ali je zbog male brzine izgled kontakta sličan onom u slučaju statičkog trenja. Uloga maziva ne dolazi do izražaja iz razloga što relativna brzina nije dovoljna da se izgradi potrebni film maziva koji bi razdvojio površine u kontaktu [1].

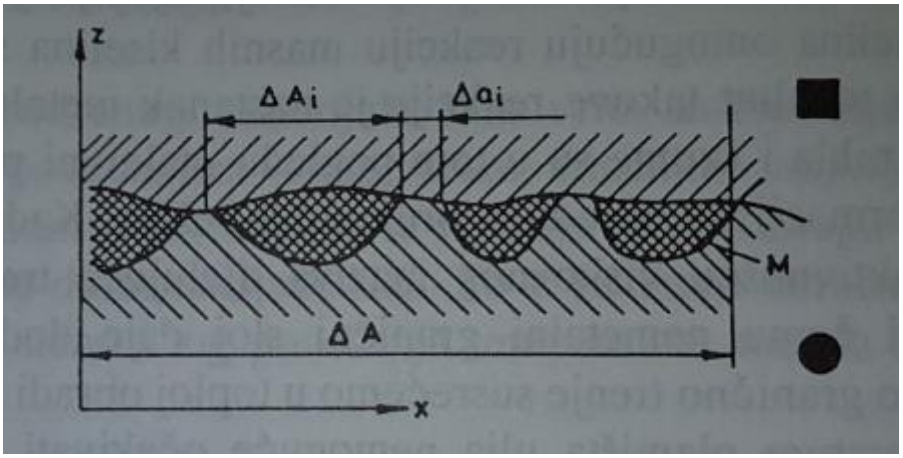
Postojanje direktnog dodira graničnih slojeva u njima izaziva smično naprezanje. U graničnom sloju neravnine su ispunjene slojem oksida i mazivom, na taj se način sprječava prodiranje nečistoća i drugih tvari u materijal. Smična čvrstoća graničnog sloja kao krute tvari je višestruko veća od one koja se javlja u mazivima kao fluidu, pa je i sila trenja koja se javlja u režimu graničnog trenja relativno velikoga iznosa. Zbog izravnog kontakta, trošenje površina je intenzivno, pa se vrijeme zadržavanja u ovom režimu nastoji skratiti na najmanju moguću mjeru [1].



Slika 4. Model graničnog trenja [3]

2.1.3. Mješovito trenje

Porastom iznosa relativne brzine gibanja, viskozna sila maziva je dovoljna da onemogući potpuno istiskivanje maziva iz područja kontakta. Povećanje količine maziva u području kontakta smanjuje površinu direktnog kontakta, a time i silu trenja. Količina maziva koja se nalazi u području kontakta ovisi o: relativnoj brzini, viskoznosti maziva i geometrije kontaktnih površina. Ovo područje traje sve do trenutka kada relativna brzina naraste do iznosa potrebnog za formiranje mazivog filma, čija je debljina veća od visine asperita. U tom trenutku dolazi do potpunog razdvajanja kontaktnih površina, a samim time i četvrtog režima, tekućeg trenja [1].



Slika 5. Shema miješanog trenja u toku deformacijskog postupka [5]

2.1.4. Tekuće trenje

Priroda tekućeg trenja ovisi o tome o kakvom kontaktu se radi. U konformnom kontaktu, javlja se hidrodinamičko trenje, dok u nekonformnom kontaktu dolazi do elastohidrodinamičkog trenja. U konformnom kontaktu, zbog relativne brzine, mazivo se utiskuje u prostor između dvaju tijela stvarajući film maziva koji je deblji od visine asperita, samim time isključen je bilo kakav kontakt između tijela. Smicanje u mazivu je višestruko manje od sila smicanja u graničnom sloju materijala, te je upravo zbog toga trenje u režimu tekućeg trenja minimalno. Kako je bilo kakav kontakt među dodirnim površinama isključen, trošenje je u ovom režimu zanemarivo [1]. Za tekuće trenje vrijedi Newton-ov zakon:

$$F_t = \frac{zS_v}{h}$$

gdje je: F_t - sila trenja, N

z - sposobnost tečenja, MPa

S - površina klizanja, mm^2

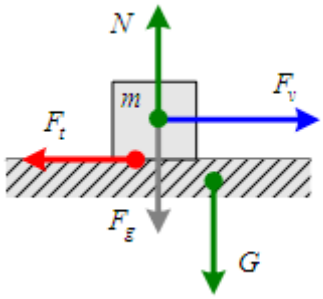
h - debljina sloja maziva, mm

Sposobnost tečenja je svojstvo koje pokazuje koliko naprezanje pojedini materijal može podnijeti. Određuje se ispitivanjem epruveta, te se iz dobivenog dijagrama mogu očitat podaci o točnoj vrijednosti.

2.2. Sila trenja

Kada se dodirnu dva tijela javlja se trenje koje se protivi uzajamnom gibanju tijela.

Sila trenja koja se mora savladati za uzajamno pomicanje tijela razmjerna je normalnoj sili kojom jedno tijelo djeluje na drugo, a neovisna je o površini dodira [4].

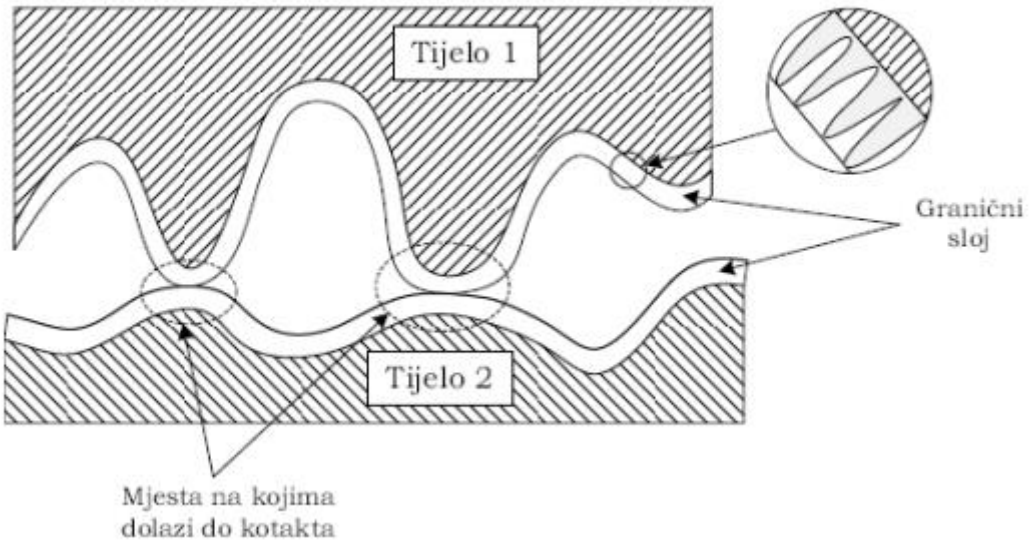


Slika 6. Trenja na horizontalnoj površini [4]

Sila trenja F_T uvijek ima suprotan smjer od vučne sile F_v

2.2.1. Priroda nastanka sile trenja

Kako bi se razumjela priroda nastanka trenja, potrebno je promatrati dodirnu površinu dvaju tijela na mikroskopskoj razini. Površina tijela obično je hrapava i prekrivena graničnim slojem vlakana. Stvarni se kontakt između dvaju tijela ostvaruje preko niza asperitnih veza, a ne cijelom (geometrijskom) dodirnom površinom [1].



Slika 7. Mikroskopski pogled na dodirnu povšinu dvaju tijela [1]

2.3. Faktor trenja

Faktor trenja μ, ako je poznat daje uz poznatu normalno djelujuću silu veličinu sile trenja jer vrijedi:

$$\mu = \frac{F_t}{N}$$

gdje je: μ - faktor trenja

F_t - sila trenja, N

N - Normalna sila, N

Iz izraza slijedi da je faktor trenja određen pored veličine normalno djelujuće sile, samo silom trenja, a da niti jedan od utjecajnih čimbenika navedenih u uvodu nije pri tom uključen.

2.4. Trenje u strojarstvu

Trenje u pravilu prate štetni gubitci energije, primjer učinka trenja prikazan je u tablici 1. Međutim, kod kočnica (slika 8) trenje je korisno, te se njime namjerno sustavu oduzima mehanička energija, koja se konvertira u termičku energiju [4].



Slika 8. Kočenje automobila [4]

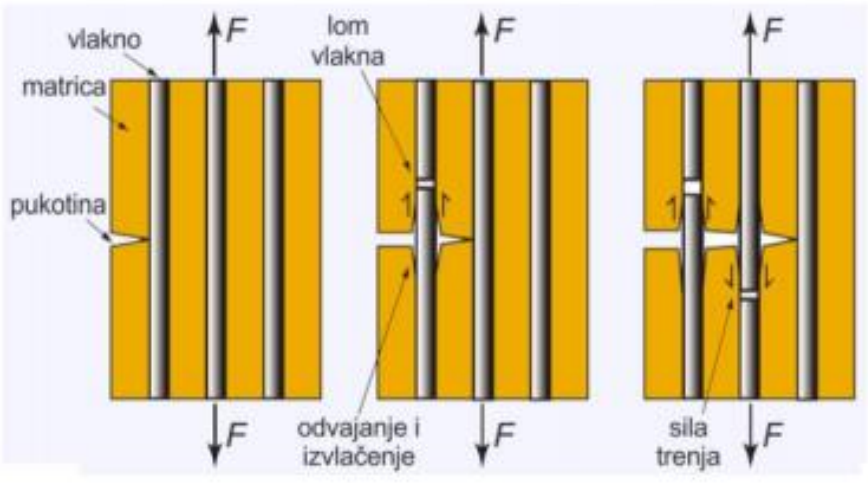
Trenje ima ključnu ulogu u spojevima nepomičnih i pomičnih strojarskih elemenata. U tablici 1. prikazani su sustavi sa poželjnim i nepoželjnim trenjem.

POŽELJNO TRENJE	NEPOŽELJNO TRENJE
• Kočnice, spojke	• Klizni ležaji, valjni ležaji, vodilice
• Pneumatici/ceste, kotač/šine	• Brtve
• Tarni prijenosnici	• Zupčani i lančani pogoni
• Remeni prijenosnici	• Vijčani prijenos
• Vijčani spojevi	• Klipni prsteni/cilindri
• Konična sjedišta	• Ventil/vodilica ventila, bregasti mehanizam
• Amortizeri	• Postupci obrade plastičnim deformiranjem
• Transportne trake, transportni materijal	• Postupci obrade skidanjem strugotine

Tablica 1. Primjeri strojarskih elemenata s poželjnim i nepoželjnim trenjem [4]

Ukoliko promatramo kompozitne materijale ojačane vlaknima čija je uloga nositi opterećenje može se zaključiti sljedeće:

Uslijed statičkog trenja između površina ojačavajućih vlakana i nalijegajuće površine matrice, otežano je širenje pukotine kompozita s vlaknima (Slika 9).



Slika 9. Širenje pukotina u kompozitu [4]

3. TRENJE PRI OBLIKOVANJU DEFORMIRANJEM

Trenje nastaje u slučaju uzajamnog djelovanja tijela koja se dodiruju neposredno ili preko drugog tijela. Kontaktnim trenjem pri plastičnoj preradi podrazumijeva se trenje koje se odvija na dodirnim površinama alata i proizvoda koji se deformira. S trenjem su povezani: energetski uvjeti deformacije, postojanost alata, kvaliteta proizvoda i izbor tehnologije proizvodnje. Trenje u procesima plastične deformacije metala po pravilu je granično trenje. Razlog tome pripada visokom radnom tlaku. Sljedeći su pristupi u razvoju teorije trenja [3]:

- Geometrijski pristup
- Molekularni pristup
- Deformacijski pristup
- Kombinirani pristup

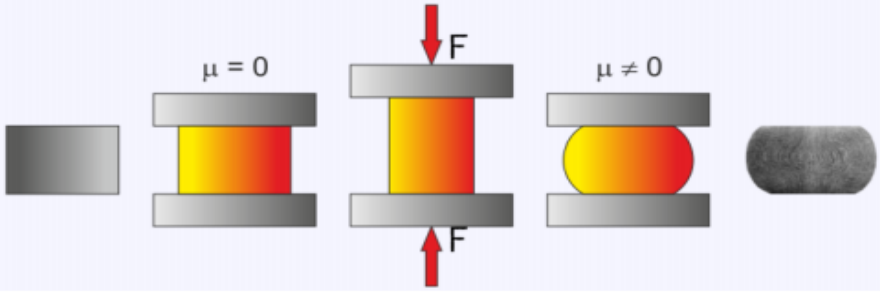
Geometrijski pristup tumači trenje na osnovu mikrohrapavosti i čisto je geometrijski pogled na trenje. Površine koje dolaze u kontakt nemaju savršeno glatke plohe, nego su na njima prisutne mikroizbočine i udubljenja. Prilikom kontakta, zbog navedenih neravnina, povećana je ukupna kontaktna površina, a mikroneravnine pružaju otpor međusobnom gibanju dvaju ploha.

Molekularni pristup tumači trenje kao rezultat djelovanja molekularnog privlačenja i zasniva se na molekularno - kinetičkim predodžbama. Relativno gibanje površina uzrokuje dakle kidanje međumolekularnih veza.

Deformacijski pristup tumači trenje preko rada potrebnog za deformaciju nekog volumena, a uzrok trenju je otpor metala neravninama. Deformacijski pristup detaljnije je pojašnjem u sljedećem poglavlju.

Kombinirani pristup povezuje pojedine pravce razvoja teorije trenja, te uzima u obzir mikroneravnine kao i međumolekularno privlačenje.

Kao što je već rečeno, trenje ima značajnu ulogu u oblikovanju materijala plastičnim deformiranjem (slika 10).



Slika 10. Deformiranje komada pri plastičnoj deformaciji [4]

3.1. Teorijske osnove trenja kod oblikovanja deformiranjem

Zbog neravnih (hrapavih) površina, trenje se javlja na dodirnim površinama između dvaju metala. Čestice jednog metala popunjavaju neravnine u drugom metalu. Dolazi do zaljepljivanja potpuno čistih, neoksidiranih površina metala. Značajnije zaljepljivanje moguće je samo pri trenju površina u vakuumu kada na površinama nema oksidnog sloja. U običnim uvjetima postupaka oblikovanja deformiranjem na dodirnim površinama se nalazi neki sloj, mazivo [3].

Kontaktno trenje javlja se pri svim tehničkim procesima plastične prerade metala. Naziva se trenjem na dodirnoj plohi između alata i proizvoda koji se deformira. Ima veliki utjecaj na provedbu tehničkih procesa plastične prerade metala [3]:

- izmjene sheme sila pri deformaciji
- izaziva nejednoliku raspodjelu deformacije, stvara područje otežane deformacije, izaziva pojavu dopunskih i zaostalih naprezanja prvog reda
- zahtjeva dopunski rad
- negativno utječe na trenje alata radi povećanog zagrijavanja.

Uvjetno možemo razlikovati sljedeće vrste trenja [3]:

- suho trenje
- granično trenje
- polusuho trenje (trenje uz apsorbirano mazivo)
- tekuće trenje koje se odvija uz hidrodinamičko mazivo

Prikazana sistematika vidova trenja ukazuje na složenost zbivanja na kontaktnim površinama frikcionog para i u zonama metala neposredno uz kontaktne površine.

3.2. Utjecaj pojedinih faktora na proces trenja u uvjetima oblikovanja metala deformiranjem

Prethodno su spomenuti samo neki od čimbenika koji utječu na veličinu faktora trenja μ.

Međutim, treba navesti i druge utjecajne čimbenike [5]:

Mazivo - pravilnim izborom maziva može se značajno smanjiti trenje, a samim time i deformacijska sila. Pomoću maziva optimalne viskoznosti u hladnoj obradi deformiranjem moguće je postići uvjete trenja bliske hidrodinamičkom trenju.

Hrapavost površine alata ima važnu ulogu iz razloga što potpomaže zadržavanju maziva i stvaranju uvjeta za približno postizavanje režima hidrodinamičkog trenja. Pri tome se javljaju najmanje sile kontaktnog trenja na površinama alata s pravilnim i ujednačenim reljefom hrapavosti.

Hrapavost površine izratka značajna je samo u početku deformacijskog postupka. U toku deformacije, površina izratka u potpunosti je sukladna s površinom alata. Ipak, i ovdje treba istaknuti korisnost pravilne i jednolike hrapavosti površine. U takvom slučaju, mazivo će se jednoliko raspodijeliti po površini.

Brzina deformacije ima bitan utjecaj na trenje. Njezinim povećanjem trenje se u pravilu smanjuje. Nažalost, u tehnološkoj praksi ovu spoznaju malo možemo iskoristiti jer se deformacijski procesi u industriji obavljaju na raspoloživim strojevima, kod kojih je rijetko moguće mijenjati brzine deformiranja.

Temperatura deformiranog materijala ima vrlo složen utjecaj na veličinu sile kontaktnog trenja. Povećanjem temperature, značajno se mijenjanju fizikalno-kemijska svojstva maziva, a na kontaktnim površinama se stvaraju oksidi. Zaključno tome valja očekivati porast sile trenja, odnosno veličine deformacijske sile. U realnom deformacijskom procesu to ne primjećujemo iz razloga jer je istovremeno zbog povećanja temperature metala naprezanje plastičnog tečenja k_f smanjeno.

Stupanj deformacije djeluje na stabilnost mazivnog sloja. Povećanjem stupnja deformacije mazivi sloj bit će istisnut i razoren. Na kontaktnu površinu dolaze novi slojevi metala koji više nisu pokriveni mazivim slojem, te će povećanjem stupnja deformacije sila trenja znatno porasti, a samim time i deformacijska sila.

3.3. Deformacijski strojevi

Postupci oblikovanja deformiranjem provode se, ovisno o vrsti i zahtjevima pojedinog postupka, na različitim deformacijskim strojevima. Karakteristike strojeva na kojima se procesi provode uvelike utječu na pojavnost i veličinu trenja. Utjecaj na veličinu trenja naročito se odnosi na brzinu kretanja radnog dijela stroja, koji dalje utječe na brzinu deformiranja radnog komada.

Prilikom oblikovanja metala deformiranjem radni komad deformira se u jednom ili više koraka. Najčešće korišteni alati sastoje se iz dva dijela, strojevi imaju zadaću da vode alat i da pojedini dijelovi alata mogu zahvatiti radni komad, te dati potrebne sile, momente ili rad deformacije. Strojevi za oblikovanje metala defomiranjem ne mogu se podijeliti prema vrsti oblikovanja jer se na jednom stroju može izvršiti više različitih postupaka (savijanje, tlačenje, prosijecanje...). Upravo zbog toga podjela se vrši prema vrsti stroja, gdje pripadaju [6]:

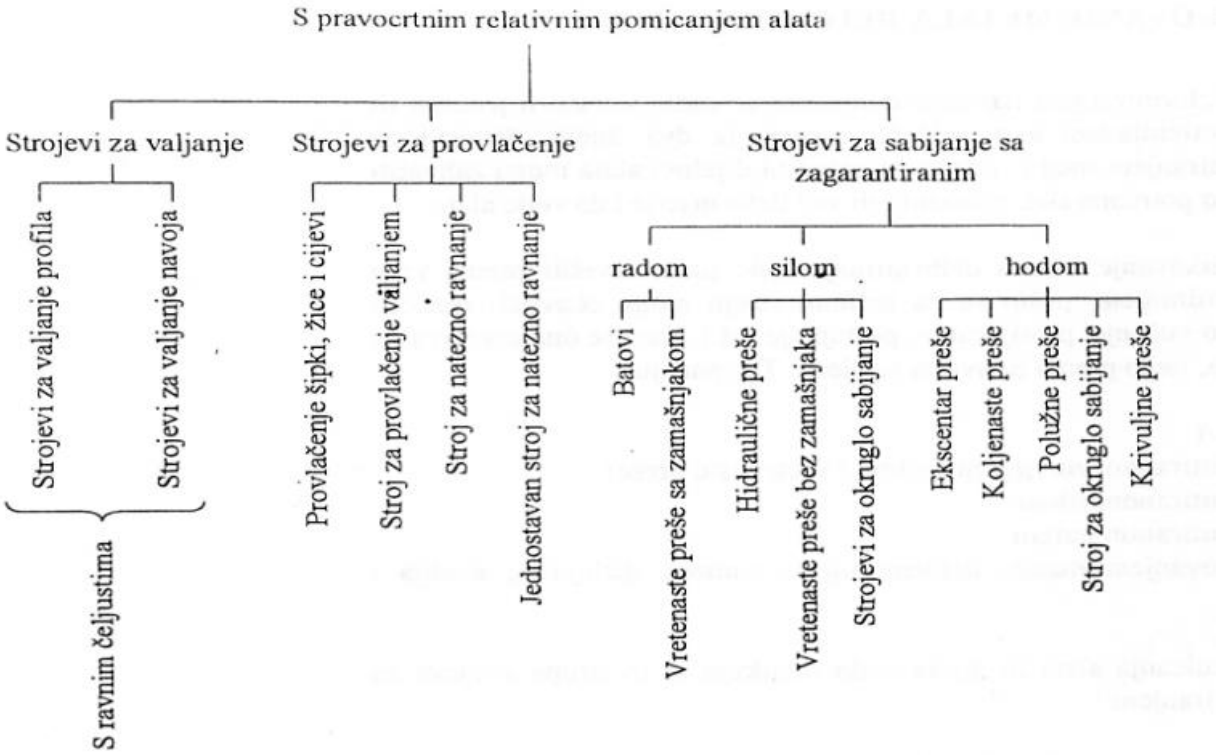
- valjački strojevi
- strojevi sa zagarantiranom energijom (batovi i vretenaste preše)
- strojevi sa zagarantiranom silom
- strojevi sa zagarantiranim putem
- strojevi za oblikovanje metala deformiranjem pomoću djelujućeg medija i djelujuće energije

Prema vrsti pomaka alata ili dijela alata razlikuju se tri grupe strojeva za oblikovanje metala deformiranjem, a to su [6]:

- s pravocrtnim pomicanjem alata
- s nepravocrtnim pomicanjem alata
- posebni strojevi (djelujući medij i djelujuća energija)

Prema vrsti pogona deformacijski strojevi dijele se na [6]:

- mehanički pogon
- hidraulični pogon
- pogon na pregrijanu paru
- pogon na komprimirani zrak (pneumatski)



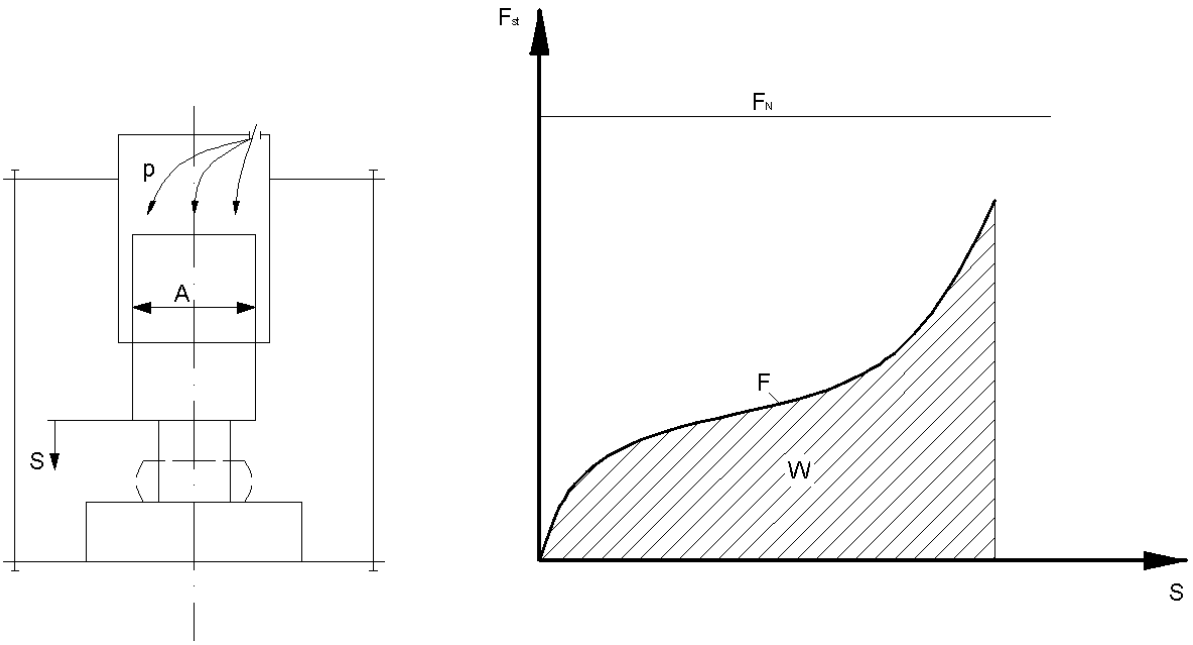
Slika 11. Shema podjele strojeva s pravocrtnim gibanjem alata [6]

3.3.1. Strojevi sa zagarantiranom silom

Ovakvi strojevi na raspolaganju imaju silu neovisno o položaju malja. Iznos sile dobiva se ovisno o konstrukciji sila i naziva se nazivna sila F_N.

Nazivna sila predstavlja karakterističnu veličinu stroja upravo zbog toga jer se ne može prekoračiti tijekom provođenja procesa [6].

Glavni predstavnik ove skupine su hidraulične preše.



Slika 12. Hidraulična preša (shematski i ograničenje sile) [6]

3.3.1.1. Hidraulične preše

Upravo hidraulična preša bit će korištena prilikom eksperimentalnog određivanja vrijednosti faktora trenja, te će u ovom poglavlju biti detaljnije objašnjena.

Hidraulične preše rade na principu hidrostatskog tlaka koji se ravnomjerno raspodijeli sustavom cijevi [7].

$$F_p = p \cdot A$$

Gdje je:

F_p - sila koja djeluje na vodilicu hidraulične preše, N

p - tlak koji djeluje na površinu klipa, N/mm^2

A - površina klipa, m^2

Dimenzije klipa koriste se kako bi se direktno izračunala sila koja djeluje na klizač. Maksimalna sila ostvaruje se ograničavanjem maksimalnog hidrauličkog tlaka preko oduška na bilo kojoj poziciji klizača [7].

Snaga sustava hidraulične preše dobije se iz sljedeće jednadžbe:

$$P = \frac{V \cdot p}{\eta}$$

Gdje je:

P - snaga hidraulične preše, W

V - volumetrički protok fluida, m^3/s

p - hidraulički tlak, N/mm^2

η - mehanički i električki gubici

Kod hidrauličnih preša za razliku od mehaničkih nema zadržavanja energije, sva snaga upotrebljava se tijekom procesa oblikovanja. Zbog toga hidraulične preše zahtijevaju znatno veću snagu nego mehaničke za istu silu pritiskanja [7].

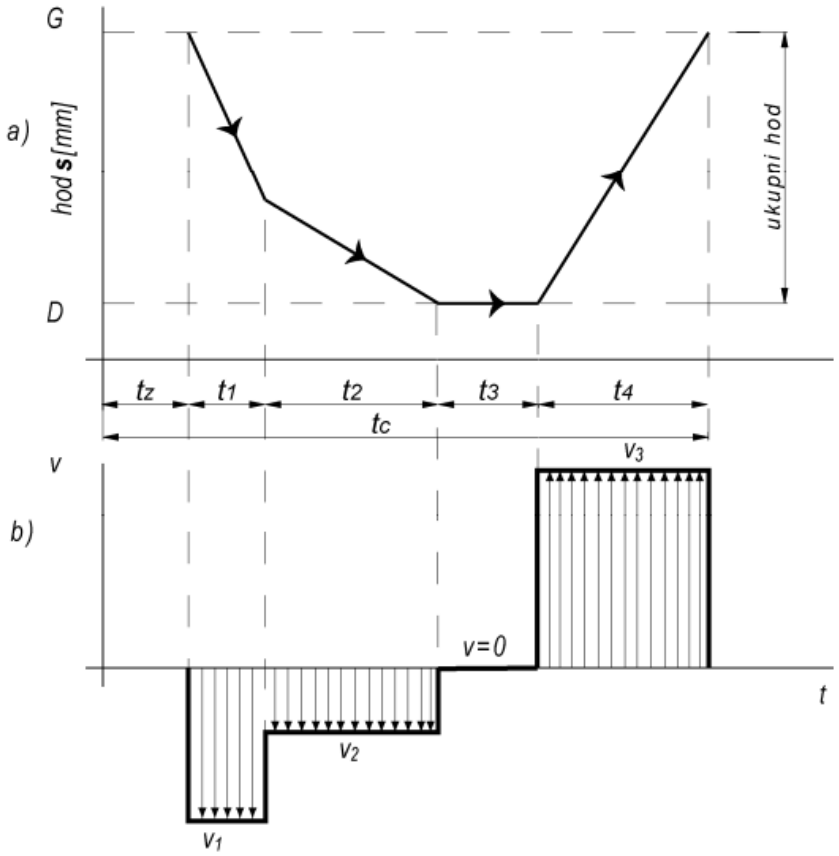
Mehaničke preše rade na principu ekscentra, a izlazni kapacitet određen je brzinom pogonskog sustava. Kod hidrauličnih preša, smjer medija (fluida) rezervira se kako bi se preša otvorila i zatvorila [7].

Vrijeme ciklusa ovisi o više varijabilnih faktora, a to su:

- cijeli hod
- hod vučenja
- sila oblikovanja
- sila praznog držača (žiga)

Prethodno nabrojani faktori optimizirani su prema odgovarajućoj matrici. Svaki od spomenutih paramatera znatno utječe na vrijeme ciklusa preše, a samim time i na izlazni kapacitet odnosno proizvodnost preše [7].

Približni radni ciklus hidraulične preše prikazan je na slici 13 i definira osnovne vremenske komponente.



Slika 13. Približni radni ciklus hidraulične preše a) dijagram hoda alata, b) dijagram brzine alata [10]

t_z – vrijeme potrebno za vađenje obratka i ubacivanje pripremka u alat

t_1 – vrijeme približavanja

t_2 – vrijeme obrade

t_3 – vrijeme zadržavanja obratka pod opterećenjem

t_4 – vrijeme povratka u početni (gornji) položaj

U hidrauličnim sustavima kod preša koristi se standardno hidraulično ulje (HLP). Ulja moraju biti sljedećih svojstava te osiguravati [7]:

- dobro podmazivanje i zaštitu od trošenja
- konstantu viskoznost na temperaturama između 20 i 60°C
- toplinsku otpornost
- malu mogućnost stvaranja pjene

- malu apsorpciju zraka
- dobru zaštitu od korozije
- dobra filtrirajuća svojstva
- nisku cijenu

Karakteristike, vijek trajanja, raspon ostvarivih tlakova te izbor brtvi, odabiru se na temelju izabrane vrste ulja. Volumen hidrauličkog fluida mijenja se pod tlakom zbog stlačivosti fluida. Kako se tlak povećava, tako se fluid u cilindru stlačuje. Ovo svojstvo utječe na kontrolu i regulaciju preše, što je veći tlak, veće je vrijeme odziva [7].

3.4. Tehnološka maziva

Tehnološka maziva primjenjuju se zbog: smanjenja kontaktnog trenja, odvođenja topline i hlađenja alata da mu se smanji habanje, smanji otpor deformaciji i rad deformacije, te smanji lijepljenje na alat. Tako se dobiju čistije površine proizvoda [3].

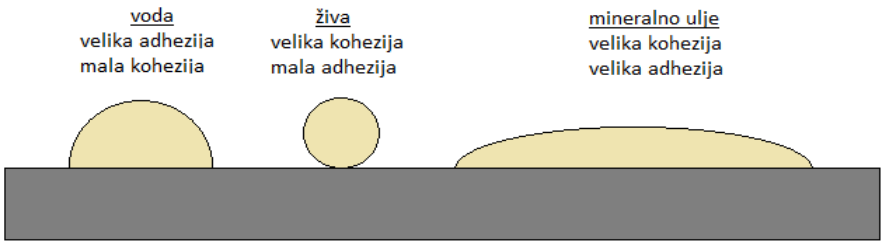
Osnovne grupe maziva su [3]:

- Tekuće emulzije koje se koriste pri hladnom valjanju, izvlačenju pri velikim brzinama, te pri vrućem valjanju Al i njegovih legura.
- Masti i smjese biljnih i mineralnih ulja, koriste se pri hladnom valjanju i izvlačenju metala velikog otpora prema deformaciji.
- Konzistentna maziva su koloidne otopine mineralnih ulja i vode povezanih sredstvom za zgrušnjavanje (sapun, parafin, vosak), pri hladnom valjanju Zn i Al folija
- Prozirno-staklasta maziva su npr. sapunski prašak ili sapunska strugotina pri dubokom vučenju čelika, tekuća (mineralna ulja) pri suspenziji grafita u vodi.
- Praškasta maziva, mogu biti suha npr. sapunski prašak ili sapunska strugotina = pri dubokom vučenju čelika, ili pak tekuća (mineralna ulja) = pri suspenziji grafita u vodi
- Metalna maziva su npr. Pb i Cu i koriste se pri dubokom vučenju čelika visoke čvrstoće.

3.4.1. Osnovna fizikalna i kemijska svojstva mazivih tvar

Osnovna fizikalno/kemijska svojstva mazivih tvari su [8]:

- dobra moć odmašćivanja – kvašenja mazivnih površina
- velika adhezija i kohezija
- neagresivnost na metale i brtve
- dobra fizikalna i kemijska stabilnost
- otpornost na vodu
- sposobnost brtvljenja
- što manja ovisnost viskoziteta o temperaturi



Slika 14. Primjer adhezije i kohezije za različite tvari

3.4.2. Podjela prema agregatnom stanju

Prema agregatnom stanju razlikuju se tri osnove vrste maziva [8]:

- Tekuća maziva (ulje, plin)
- Polučvrsta maziva (mazive masti)
- Čvrsta maziva

Mineralna maziva ulja

Većina mazivih ulja u svojoj osnovi su proizvedena preradom sirove nafte, dok se postupkom rafinacije odstranjuju sve neželjene komponente. Mineralna maziva ulja sastoje se od baznog ulja i aditiva. Aditivi su sredstva koja se dodaju mazivima radi poboljšanja svojstava.

Prilikom primjene mazivih ulja neke od značajnijih karakteristika koje dolaze do izražaja su:

- Mazivnost, viskozitet
- Otpornost prema temperaturi (visokoj ili niskoj)
- Otpornost vlazi, prašini i drugim neželjenim elementima

Mazive masti

Masti su polučvrsta maziva, koriste za podmazivanje mehaničkih dijelova gdje ulja, kao tekuća maziva iz određenih razloga ne zadovoljavaju. Zbog adhezivnih osobina masti se bolje i duže zadržavaju na površinama mehaničkih elemenata [9].

Moraju zadovoljiti sljedeće funkcije [9]:

- Podmazivanje
- Zaštita od korozije
- Spriječiti ulazak nečistoća i vode

Čvrsta maziva

Čvrsta maziva koriste se kao prah ili tanak film, te se koriste za zaštitu površina i smanjenje koeficijenta trenja. Upotrebljavaju se u slučaju [9]:

- Visokih ili ekstremno niskih temperatura
- Velikih opterećenja
- Nedostupnih ili teško dostupnih dijelova
- Povremeno podmazivanje
- Korozivnih sredstava

Jedno od najčešće korištenih maziva u industriji svakako je grafit. Grafit ima mali koeficijent trenja, te veoma veliku termičku stabilnost.

U tablici 2 prikazani su faktori koji utječu na izbor čvrstog maziva

Uvjeti	Grafit	MoS2	PTFE
Prašnjavo, prljavo okruženje	Da	Najbolji	Da
Utjecaj vlage	Poželjan	Štetan	Nema ga
Termička stabilnost °C	Izuzetna do 631°C	Dobra do 399°C	Dobra do 269°c
Noseća sposobnost	Dobra	Najbolja	Loša
Brzina*	1,2,3	1,2,3	1,2,3
Uski zazori	Da	Najbolje	Da
Nefrekventni pristup	Ne	Da	Najbolje
Vakuum	Ne	Najbolje	Da

Tablica 2. Faktori koji utječu na izbor čvrstog maziva [9]

3.5. Utjecaj trenja na provedbu tehničkih procesa

Kod hladne plastične deformacije redovito se na dodirnim površinama alata i materijala koji se oblikuje deformiranjem stvaraju veliki pritisci. Prilikom provedbe procesa hladne deformacije skoro se redovito upotrebljavaju maziva. Višak maziva smješta se u šupljinama na dodirnim površinama [3].

Najčešće se koriste mineralna ulja, koja se u cilju povišenja kemijske aktivnosti miješaju s odgovarajućim dodacima. Obično su to različite vrste aditiva koji redovito imaju aktivatore na bazi sumpora i fosfora. Vrlo često se koriste grafitna maziva. Grafit se upotrebljava u obliku listića i pri velikim pritiscima, čestice se razmazuju po površini. Grafit je jeftino mazivo i zato se dosta često upotrebljava. Posljednjih se godina koristi i molibdenov sulfid. Učinak mu je efikasniji kad je na dodirnim plohama njegov sloj tanji, a to se upravo događa kod visokih pritisaka. Vrlo je skup i to mu je osnovni nedostatak [3].

Kod tople deformacije, maziva moraju biti postojana na visokim temperaturama. Temperatura pri procesu toplog oblikovanja čelika je u temperaturnom intervalu 850°C do 1250°C. Na tim temperaturama, od svih maziva jedino je grafit postojan. Iz tog razloga koristi se koloidna otopina grafita u vodi. Kod tople deformacije, uvijek se radi o graničnom trenju. Kako je materijal zagrijan na visoke temperature neminovno u realnim industrijskim uvjetima dolazi do oksidacije površine [3].

Vrijednost faktora trenja ovisno o vrsti materijala prikazana je u tablici 3.

VALJANJE	KOVANJE	PREŠANJE	IZVLAČENJE
Sila trenja je aktivna (samo u početku zone deformacije)	Sila trenja je reaktivna	Sila trenja je reaktivna	Sila trenja je reaktivna
Utječe na širenje	Izaziva područje otežane deformacije	Neravnomjerna deformacija po dužini i presjeku	Otežava kutnu deformaciju
Utječe na tijek procesa valjanja	Tlak je najveći u sredini	Utječe na kinetiku širenja	Izaziva nejednoliku deformaciju

Tablica 3. Uloga trenja kod procesa oblikovanja deformiranjem [3]

Veličina faktora trenja za različite metale i legure prikazane su u tablici 4.

Vrsta materijala ili legura	Brzina alata, m/min	Veličina faktora trenja, μ			
		Bez podmazivanja			Uz podmazivanje
Ugljični čelik	1,0	0,4 0,35	0,45 0,4	0,35 0,3	0,12 0,06 U ovisnosti o kvaliteti metala i površini metala
Aluminijeve legure	1,0	0,5 0,48	0,48 0,45	0,35 0,3	
Magnezijeve legure	1,0	0,4 0,35	0,38 0,32	0,32 0,24	
Legure teških obojenih metala	1,0	0,32 0,3	0,34 0,32	0,26 0,24	
Vatrootporne legure teških metala	1,0	0,28 0,25	0,26 0,22	0,24 0,22	

Tablica 4. Faktor trenja u zadanim uvjetima [3]

Faktor trenja kod valjanja pri zahvatu metala valjcima i pri ustaljenom procesu valjanja u ovisnosti o valjcima i mazivu prikazan je u tablici 5.

	Valjci	Mazivo	Maksimalni kut zahvata, α	Faktor trenja pri zahvatu, μ
Hladno valjanje	Polirani	Mineralno ulje	3-4	0,052-0,070
	Slabo polirani	Mineralno ulje	6-7	0,105-0,123
	S grubom površinom	Bez podmazivanja	DO 8	0,15
Toplo valjanje	Glatki za valjanje uskih traka	Bez podmazivanja	22-24	0,404-0,445
	Kalibrirani	-	24-25	0,445-0,446
	Kalibrirani pravokutnim kalibrima	-	28-30	0,532-0,577
	Kalibrirani s pravokutnim kalibrima, nasječeni	-	28-34	0,532-0,675
	Na kontinuiranim prugama	-	27-30	0,509-0,577

Tablica 5. Faktor trenja kod valjanja pri zahvatu metala valjcima i pri ustaljenom procesu valjanja [3]

3.6. Coulombov zakon trenja

Klasična aproksimacija sile trenja između dva čvrsta tijela je poznato kao Coulombovo trenje. Za površine u relativnom kretanju, μ je koeficijent kinetičkog trenja, Coulombovo trenje je jednako F_f, a sila trenja je usmjerena suprotno od smjera kretanja jedne površine u odnosu na drugu (pri računanju trenja između dvije slobodne površine koje se kreću jedna preko druge, jedna od njih se uvijek izbacuje i zamjenjuje odgovarajućim reakcijama). Za površine u mirovanju, μ je koeficijent statičkog trenja (koje je najčešće veće od kinetičkog), Coulombovo trenje može poprimiti bilo koju vrijednost od nule do F_f, a smjer sile trenja je suprotan od smjera kojim bi se tijelo kretalo, da nije u ravnoteži [5].

Koeficijent trenja je bezdimenzionalna skalarna vrijednost koja opisuje odnos sile trenja između dva tijela i sile koja ih spaja ili čuva spojene. Ovaj koeficijent zavisi od materijala od kojeg su predmeti napravljeni. Vrijednost koeficijenta trenja se kreće u rasponu od nule pa do jedan [5].

3.7. Određivanje faktora trenja

Dva su pristupa uobičajena u istraživanjima veličine faktora trenja. Prvi je izračunavanje μ iz poznatog izraza za deformacijsku silu nakon što su sve ostale veličine u izrazu poznate, a deformacijska sila određena pokusom. Drugi, eksperimentalni način direktnog mjerenja veličine μ u određenom, obično modelnom postupku obrade metala deformiranjem [5].

U prvom slučaju, na temelju svih poznatih veličina izraza za deformacijsku silu dobivenih mjerenjem u toku deformacijskog postupka, računski određujemo veličinu μ koja se nalazi u tom izrazu. Ne bismo smjeli zaboraviti, da niti jedan od izraza dobiven na osnovu bilo koje teorijske metode za određivanje deformacijske sile nije i ne može biti egzaktan. Stoga, svaki takav izraz moramo prihvatiti samo kao bolju ili lošiju aproksimaciju točne vrijednosti deformacijske sile. Slijedi da je tako određen μ također bolja ili lošija aproksimacija stvarno djelujuće prosječne veličine faktora trenja [5].

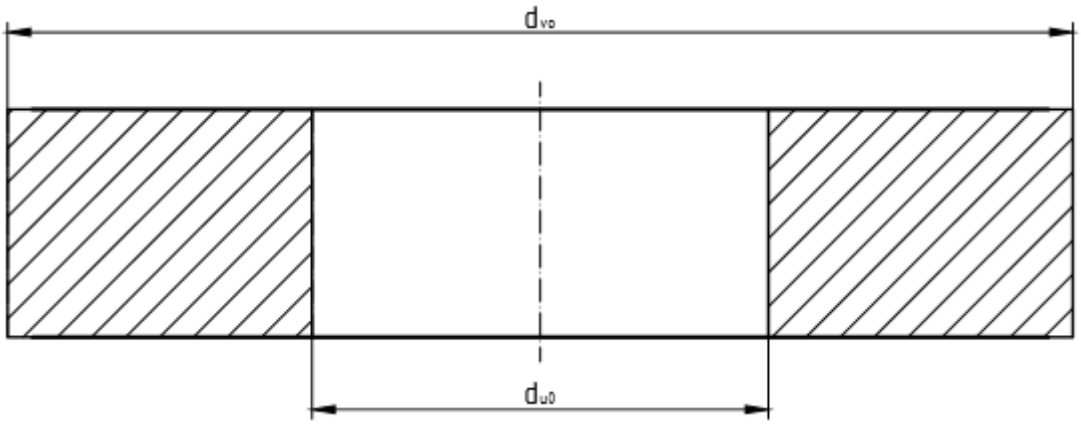
Drugi način određivanja faktora trenja ima nedostatak u tome što dobiveni rezultat vrijedi samo za uvjete eksperimenta, pa određena veličina μ predstavlja prosječnu vrijednost μ u tom eksperimentu. Poopćavanje ovako dobivenih rezultata ne bi izdržalo strogu znanstvenu i stručnu kritiku, pa stoga dobiveni rezultati daju samo dobre i za praksu uporabive orijentacijske vrijednosti veličine μ, naravno, za uvjete jednake ili približno jednake onima pod kojima je bio izvršen eksperiment [5].

3.7.1. Metoda sabijanja prstena

Većina postupaka obrade metala deformiranjem zasnivaju se na djelovanju tlačnog naprezanja. Zaključno tome razumljiva je težnja da se za takav slučaj pronađe jednostavna, jeftina i pouzdana metoda eksperimentalnog određivanja μ [5].

Upravo metoda sabijanja prstena omogućuje variranje svih relevantnih faktora potrebnih za određivanje veličine μ. Metodu su razvili u SAD-u Male i Cockcroft 1964., dok ju je u Europi popularizirao Burgdorf [5].

Kao ispitni uzorak koristi se ispitna epruveta prstenastog oblika prikazana na slici 15.

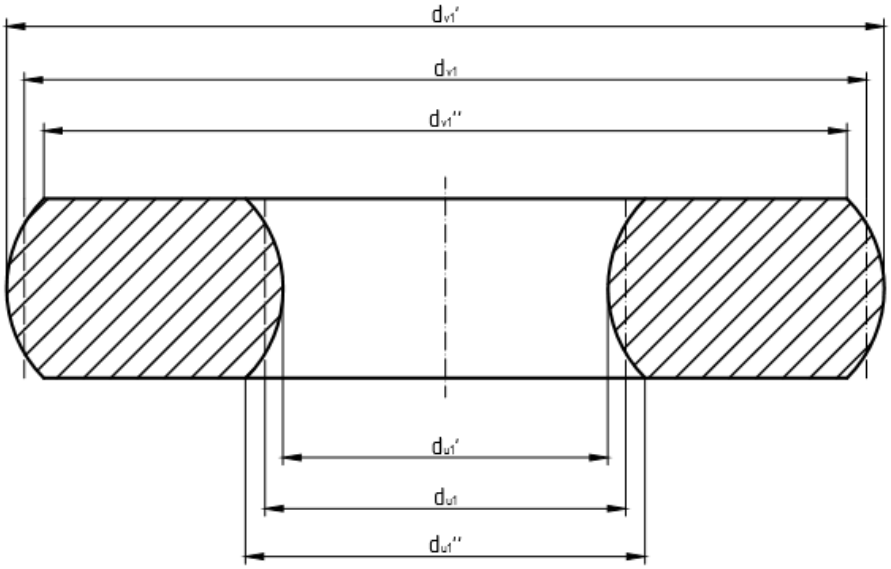


Slika 15. Prstenasta epruveta

Dimenzije prstena prije deformacije su:

- Unutarnji promjer d_{u0} = 10 mm
- Vanjski promjer d_{v0} = 20 mm
- Visina h_0 = 7 mm

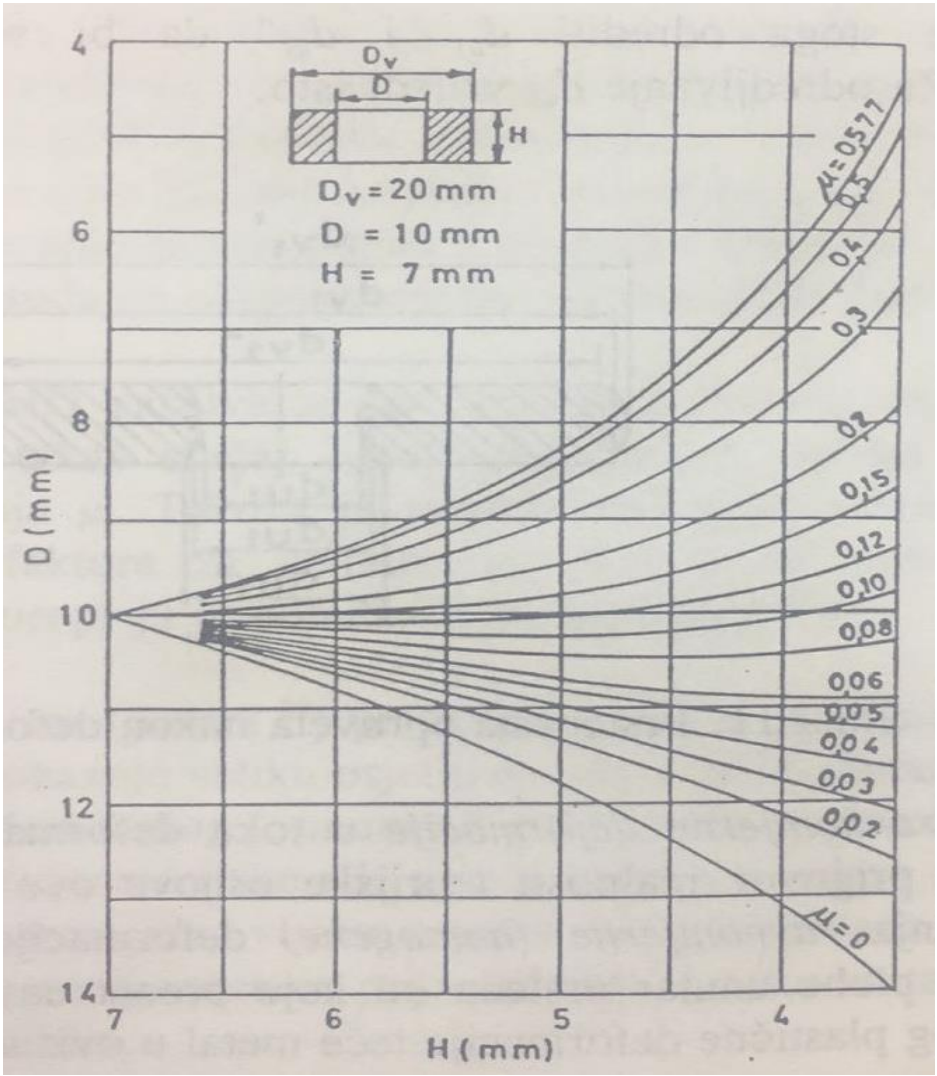
Nakon deformacije, tlačnom silom pokazuje veliku osjetljivost dimenzije unutarnjeg promjera d_{u0} na veličinu kontaktnog trenja. Kod malog μ unutarnji promjer povećat će se, a kod velikog μ smanjiti. Mjerenje veličine deformacijske sile nije potrebno, a nakon izvršene deformacije, mjeri se pored unutarnjeg promjera, visina prstena h_1 koja je sada manja od one prije deformacije h_0 [5].



Slika 16. Prstenasta epruveta nakon deformiranja

Prstenasta epruveta može se izraditi od različitih materijala koji su različite površinske hrapavosti, te se kod različitih temperatura mogu koristiti razna maziva. Sama deformacija može se obaviti različitim brzinama deformacije. Sve to ukazuje na velike mogućnosti Burgdorffove metode. Podatak o djelujućem faktoru kontaktnog trenja očitava se iz kalibracijskog dijagrama prikazanog na slici 17. Poteškoće nastupaju kod mjerenja unutarnjeg promjera prstena d_{u1} postignutog nakon deformacije [5].

Kalibracijski dijagram kako je ranije spomenuto, služi za očitavanje djelujućeg faktora trenja nakon izvršene deformacije prstena. Za samo očitavanje potrebno je znati visinu na koju je prsten sabijen te unutarnji promjer.



Slika 17. Kalibracijski dijagram za određivanje faktora trenja prema Burgdorffu [5]

Zbog neravnomjerne deformacije, prsten nema cilindričan oblik nakon sabijanja, te je potrebno odrediti d_{u1}' i d_{u1}'' kako bi se pomoću tih veličina odredio d_{u1}.

Unutarnji promjer koji služi za očitanje koeficijenta trenja dobije se iz sljedeće jednadžbe:

$$d_{u1=}\frac{2d_{u1}'' + d_{u1}'}{3}$$

gdje je: d_{u1}'- minimalni unutarnji promjer, mm

d_{u1}'' - maksimalni unutarnji promjer, mm

d_{u1} - srednja vrijednost unutarnjeg promjera, mm

Postojanje neravnomjerne deformacije u toku deformacijskog postupka prstenaste epruvete ozbiljan je prigovor realnosti teorijske osnove ove metode. Naime, koristi se pretpostavka postojanja ravnomjerne (homogene) deformacije i postojanje već opisane razdjelne cilindrične plohe unutar prstena od koje prema unutarnjem i prema vanjskom promjeru prstena zbog plastične deformacije teče metal u ovisnosti o djelovanju kontaktnog trenja [5].

Metoda sadrži i druge nedostatke:

- Ne uključuje značajke materijala (npr. anizotropiju, veličinu zrna i ost.)
- Ne uzima u obzir utjecaj vanjskih čimbenika

Zbog takvih razloga, rezultate očitane iz prethodnog dijagrama ne shvaćamo kao apsolutno istinite. Međutim, ako u sistematskim pokusima za određivanje μ koristimo isti materijal prstena uz variranje ostalih inače jednakih uvjeta pokusa, moguće je doći do pouzdanih relativnih odnosa μ [5].

Apsolutne veličine μ valja shvatiti samo kao dobru aproksimaciju. Lakoća izvođenja sistematskih pokusa i niska cijena, uz spomenuta ograničenja, bit će i dalje presudna za primjenu ove metode [5].

U nastavku rada bit će detaljno objašnjen postupak dobivanja Burgdorffovog dijagrama pomoću simulacijskog 2D programa MSC Marc Mentat

4. EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKO ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA FAKTORA TRENJA μ

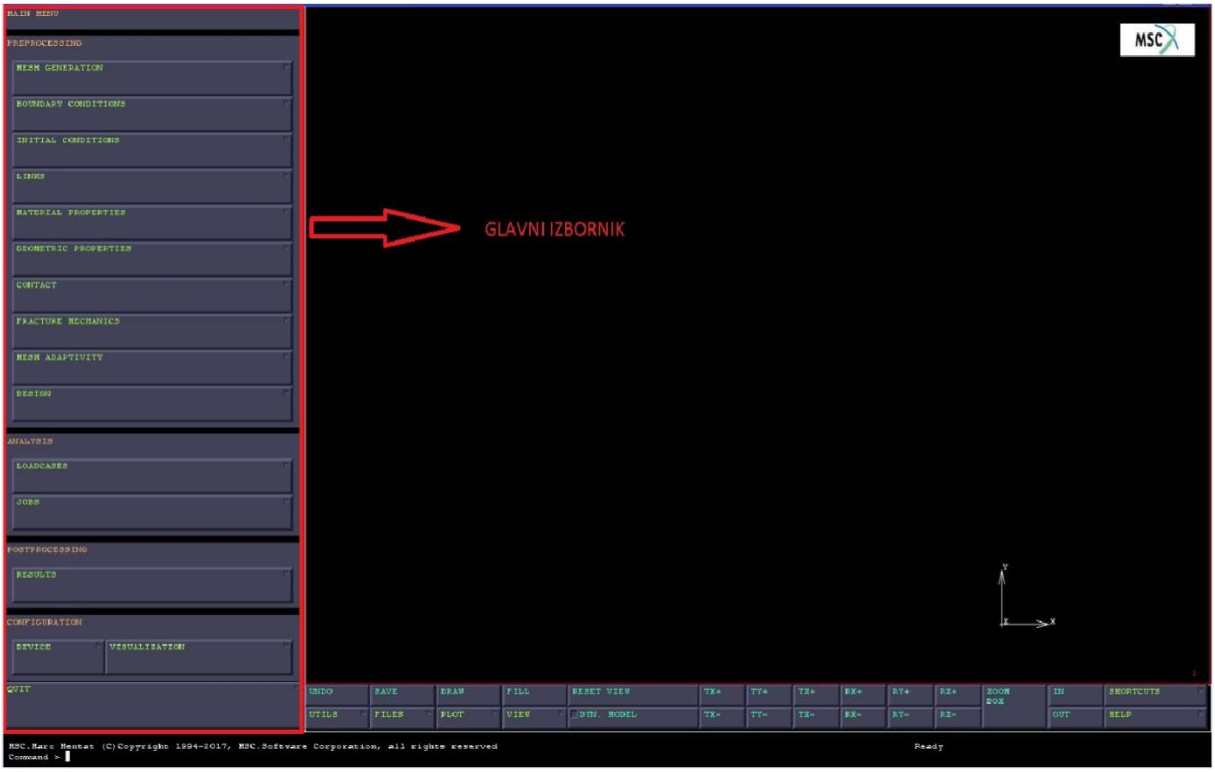
Eksperimentalno određivanje vrijednosti koeficijenta faktora trenja, kao što je spomenuto u poglavlju prije, provest će se pomoću simulacijskog programa MSC Marc Mentat.

Rezultati, te izgled krivulja bit će prikazani za pet karakterističnih vrijednosti faktora trenja, dok će detaljan postupak dobivanja vrijednosti biti prikazan samo za jedan slučaj. Za preostale četiri vrijednosti rezultati će biti prikazani grafički, te tablično.

4.1. Postupak rada u programu MSC.Marc Mentat

4.1.1. Pokretanje programa

Na slici 18 prikazana je početna stranica nakon pokretanja programa. Svi daljnji koraci započinjat će odabirom jedne od glavnih opcija koje se nalaze u izborniku sa lijeve strane.



Slika 18. Početna stranica programa

4.1.2. Konstruiranje sirovca

Prvi korak je konstruirati model ispitnog prstena.

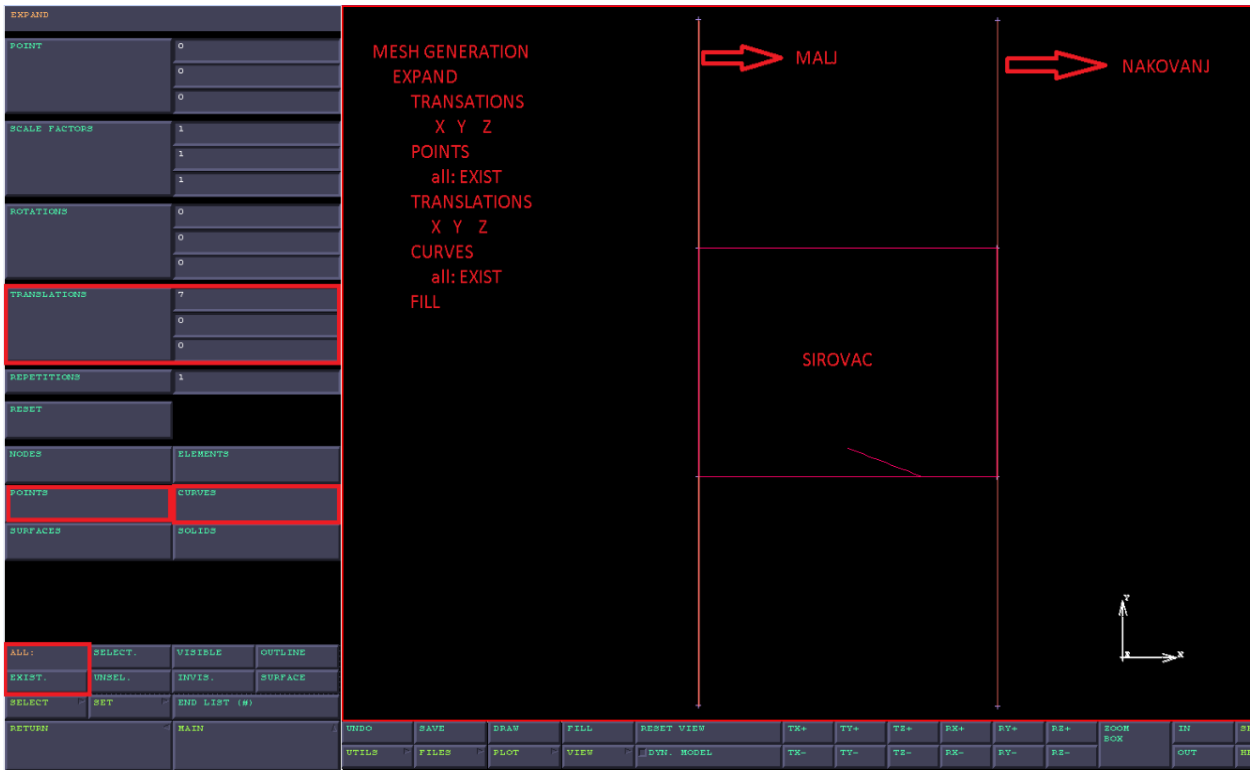
Odabirom funkcije "*mesh generation*" otvara se novi izbornik, te se odabire "*pts add*". Redom se unose željene koordinate prve točke (x,y,z).

Ukoliko točka nije vidljiva na radnoj površini, potrebno je pritisuti funkciju *"fill"* koja će automatski pozicionirati točku u središte radnog prozora (Slika 19).



Slika 19. Pozicioniranje prve točke

Daljnjim odabirom funkcije "*expand*", a potom odabirom funkcije "*translation*", te unošenjem koordinata (x,y,z) moguće je točku pretvoriti u pravac potrebnog smjera i iznosa ovisno o unesenim koordinatama. Nakon unosa koordinata, odabire se funkcija "*points*", a potom je na radnom prostoru potrebno odabrati točku, te sve potvrditi tako što se pritisne desna tipka na mišu. Nakon dobivenog pravca njega također možemo translatirati u željenom smjeru na isti način kako je to prethodno opisano za točku, te dobiti potrebni izgled našeg radnog komada koji je prikazan na slici 20. Na slici su vidljive dvije dodatne linije koje predstavljaju malj te nakovanj. Također su konstruirane kombinacijom prethodno spomenutih opcija, ali postupak njihovog konstruiranja nije prikazan na slici.



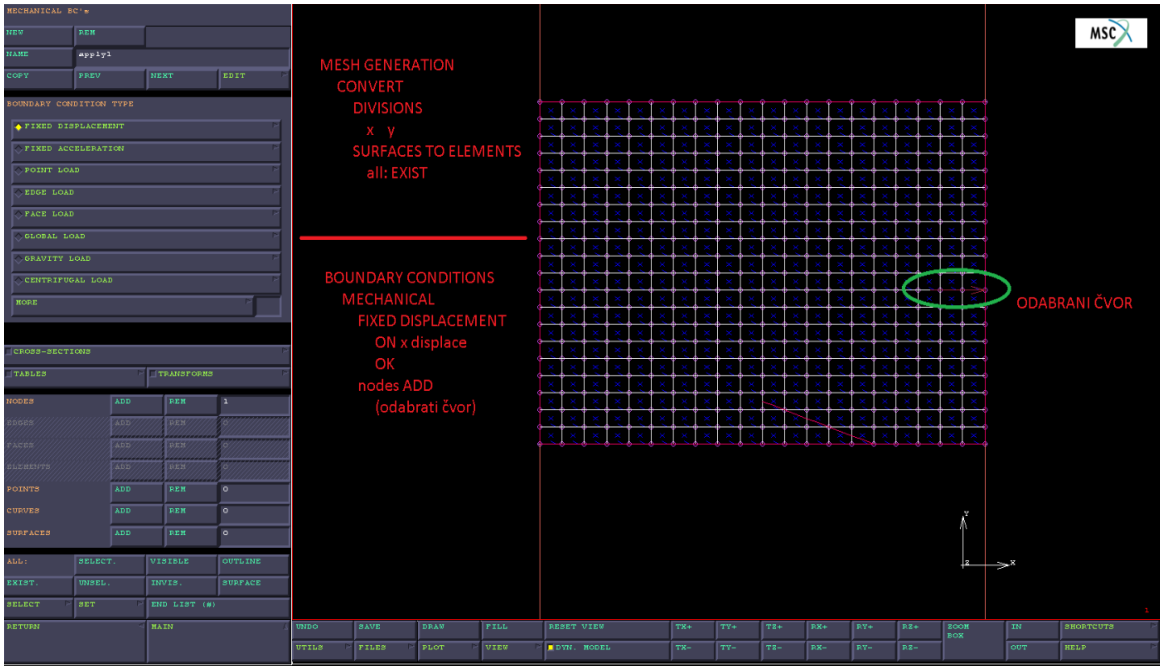
Slika 20. Radni komad

4.1.3. Mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti

Nakon dobivenog željenog komada istom će se dodijeliti mreža konačnih elemenata kako bi se kasnije za svaki određeni čvor mogli točno očitati pomaci po *x* i *y* osi, odnosno, promjena visine ispitnog prstena i unutarnjeg promjera. Što je mreža sitnija, odnosno čim više elemenata sadrži rezultati, nakon simulacije bit će točniji. Za slučaj tlačenja ispitnog prstena koristit ćemo mrežu 20 x 20. Postavljenje mreže kreće odabirom funkcije"*mesh generation*" potom se odabire funkcija "*convert*", te se pojavljuju nove opcije gdje je potrebno odabrati funkciju "*divisions*" i unijeti željenu veličinu mreže (x, y). Nadalje, odabire se funkcija "*surfaces to elements*" te označavamo dio kojemu želimo dodijeliti mrežu, najjednostavnije je odabrati "*all: exist*".

Za postavljanje rubnih uvjeta iz početnog izbornika odabiremo "*boundary conditions*" nakon čega se odabire "*mechanical*". Pritom se otvara novi izbornik u kojemu je potrebno odabrati funkciju "*fixed displacement*", te nakon otvaranja novog prozora odabiremo "*on x displace*" te je potrebno pritisnuti funkciju "*ok*". Potom se mora pridružiti nepomičan čvor koji želimo imati na način da se odabere funkcija "*nodes add*", te se bira željeno mjesto na mreži.

Cijeli postupak završimo pritiskom desne tipke miša. Na mreži se pojavljuje strelica što se može vidjeti na slici 21.



Slika 21. Mreža konačnih elemnata

4.1.4. Određivanje svojstava materijala

Prvi korak je iz poznatog dijagrama krivulje tečenja za određeni materijal očitati nekoliko karakterističnih točaka koje će se unijeti u program. U ovom radu korišten je materijal Al 99.5. Krivulja tečenja za konkretan materijal dana je u prilogu [I]. Iz priloga su očitane vrijednosti prikazane u tablici 6.

Al99.5	
φ	k_f, N/mm^2 = Mpa
0	45
0.2	60
0.4	100
0.6	110
0.8	115
1	120

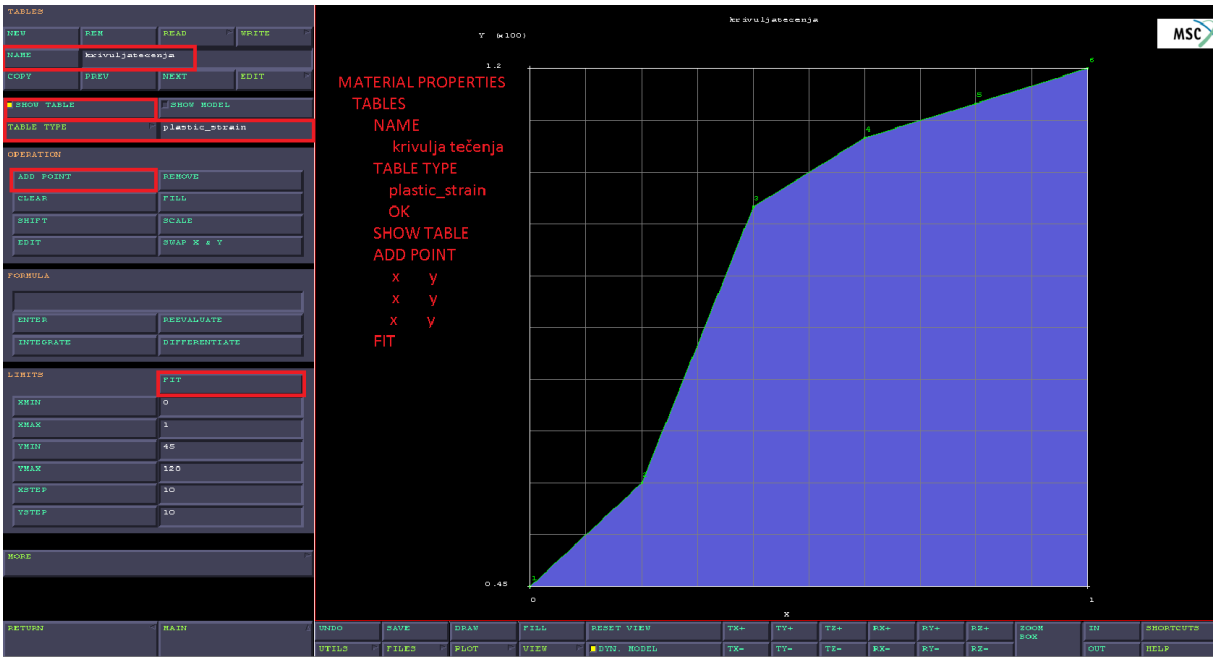
Tablica 6. Karakteristične vrijednosti za materijal Al 99.5

Gdje je:

ϕ - logaritamski stupanj deformacije

k_f - naprezanje plastičnog tečenja, N/mm2

Nakon dobivenih vrijednosti za nekoliko točaka, istu tablicu potrebno je napraviti u programu na sljedeći način. Na glavnom izborniku potrebno je odabrati "*material properties*", nakon otvaranja novog izbornika potrebno je stisnuti opciju "*tables*", te upisati naziv tablice "*name*" (npr. krivulja tečenja), te zatim odabrati vrstu tablice "*table type*" - "*plastic _strain"*. Kako bi na radnoj površini bila vidljiva tablica, a ne model potrebno je odabrati opciju "*show table*". Nakon definiranja vrste tablice, odabiremo opciju "*add point*", te se redom unose točke kako su prethodno dobivene očitanjem iz krivulje tečenja. Nakon unosa točaka, potrebno je odabrati opciju "*fit*". Izgled nakon unosa točaka i cijeli postupak prikazan je na slici 22.



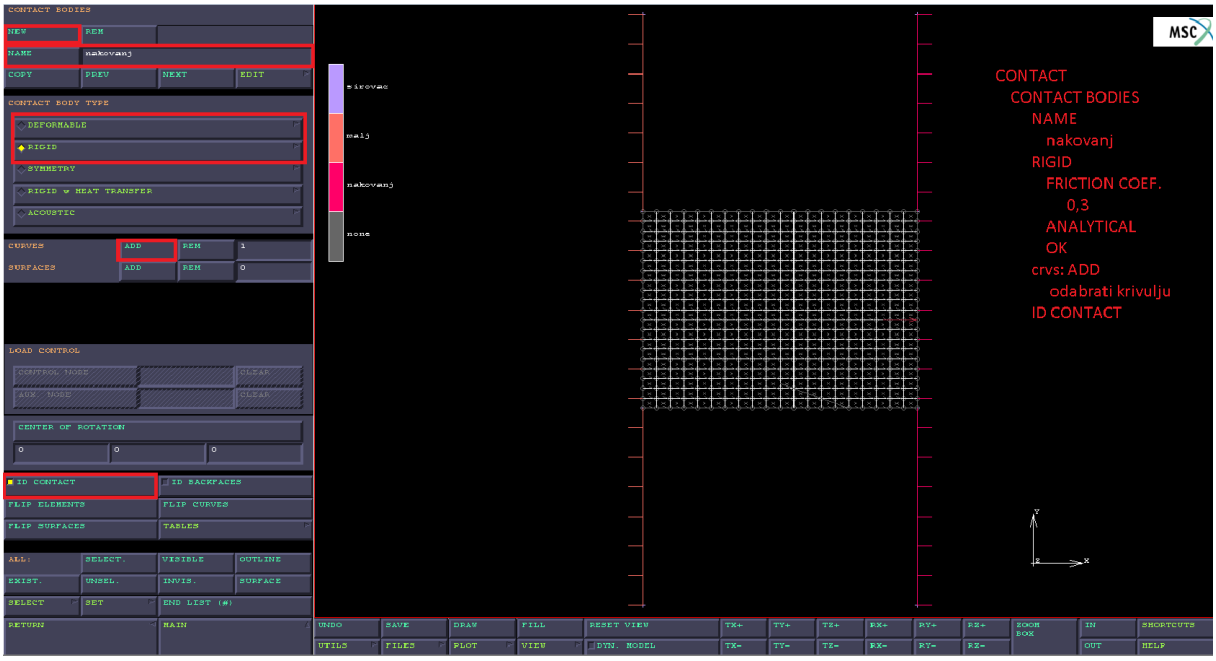
Slika 22. Prikaz krivulje nakon unesenih točaka

U sljedećem koraku potrebno je pridružiti kreiranu tablicu s podacima za određeni materijal elementima. Nakon otvaranja izbornika funkcije *"material properties"* potrebno je odabrati *"isotropic"*, te unijeti točne vrijednosti za *Youngov* modul elastičnosti i koeficijent trenja za koji želimo dobiti promjenu unutarnjeg promjera. Potrebno je također pod funkcijom *"plasticity"* odabrati *"elastic - plastic"*, te nakon što je otvoren novi prozor unijeti pod *"inital yield stress"* vijednost 1, a funkciji *"table"* dodijeliti prethodno kreiranu tablicu pod nazivom krivulja tečenja. Sve postavljene vrijednosti i odabrana tablica pridružit će se elementima tako što se odabire *"elements add"* i pridružujemo sve postojeće elemente odabirom *"all: exist"*. Ovaj tijek postupka nije prikazan slikom, te je potrebno samo pratiti prethodno objašnjene korake.

4.1.5. Definiranje kontakata između tijela

U ovom koraku potrebno je definirati na konstrukciji malj, nakovanj te sirovac (ispitni prsten). Svakom od njih dodijelit će se koeficijent trenja u iznosu 0,3, te svojstvo deformabilnosti. Malj i sirovac označit će se kao kruta tijela, dok će sirovac biti označen kao deformabilno tijelo. Malju je potrebno pridružiti tablicu brzine gibanja koja će se napraviti na sličan način kao prethodno objašnjena.

Odabirom funkcije *"contact"* iz glavnog izbornika otvara se novi izbornik, te se odabire funkcija *"contact bodies"*. Potrebno je upisati naziv (npr. sirovac), te pritisnuti *"deformable"* nakon čega se otvara novi prozor gdje je potrebno klikom na *"friction coefficient"* upisati vrijednost faktora trenja (0,3). Kao i prije, potrebno je dodijeliti elemente sirovcu korištenjem funkcije *"elements add"* i odabrati *"all exist"*, te pripaziti da je označena funkcija *"id contact"*. Opisani postupak potrebno je ponoviti za malj i nakovanj odabirom funkcije *"new"*. Za razliku od sirovca, kod njih je potrebno umjesto opcije "*deformable*" odabrati opciju *"rigid"*, te unijeti faktor trenja, a na završetku dodijeliti krivulju pojedinom dijelu odabirom funkcije *"curves add"*, te označavanjem željene krivulje. Nakon ispravno provedenih prethodno pojašnjenih koraka, radni komad trebao bi biti definiran kao što je prikazano na slici 23.



Slika 23. Definiranje malja, nakovnja i sirovca

Kao što je navedeno u prethodnom koraku, malju je potrebno dodijeliti tablicu brzine gibanja. Odabire se funkcija *"tables"*, te je potrebno kreirati novu tablicu kako bi ranije spomenuta

tablica za svojstva materijala ostala nepromijenjena. Odabire se *"new"*, te unosi naziv gibanje malja. Vrstu tablice potrebno je definirati odabirom funkcije *"table type"* i odabrati *"time"*. Nakon što je definirana i kreirana tablica potrebno je unijeti vrijednosti za slučaj ranije spomenutog tlačenja ispitnog prstena (tablica 7). Nakon provedenih svih prethodno objašnjenih koraka odabire se funkcija *"fit"*, te je konačan izgled vidljiv na radnoj površini (Slika 24).

t[s]	*v*[mm/s]
0	1,75
2	2,5
2	-12,5
3	-12,5

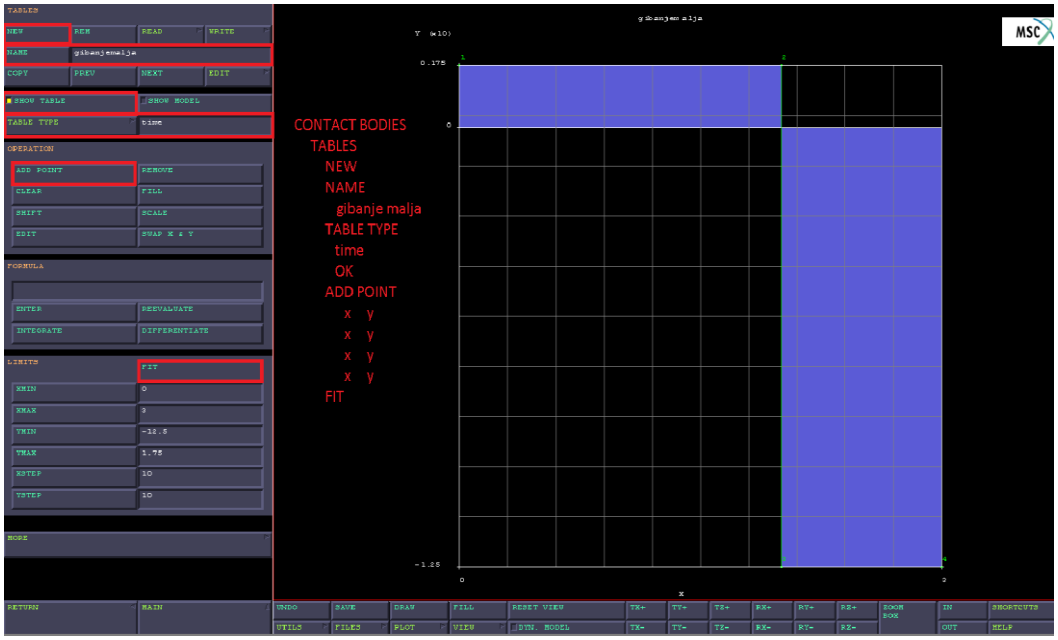
Tablica 7. Tablica vrijeme/brzina za slučaj tlačenja ispitnog valjčića

Gdje je:

t - vrijeme s

v - brzina gibanja malja mm/s

Nakon kreiranja tablice pod izbornikom *"contact bodies"*, potrebno je pronaći malj te odabrati *"rigid"*. Otvaranjem novog prozora odabire se funkcija *"velocity parameters"*. nakon čega se otvara novi prozor u kojem je potrebno za os *x* unijeti vrijednost jedan i pridružiti tablicu gibanje malja odabirom funkcije *"table"*. Na kraju sve prozore zatvoriti klikom na funkciju *"ok"*.



Slika 24. Gibanje malja

4.1.6. Slučajevi opterećenja

Potrebno je definirati dva slučaja opterećenja, a to su radni slučaj i povratni slučaj. Radni slučaj trajat će duže i mjerit će promjenu dimenzija u svim točkama. Povratni slučaj, za razliku od radnog slučaja ima samo jedan korak, a to je vraćanje malja u početni položaj nakon završetka tlačenja. Postupak kreiranja slučajeva opterećenja detaljno je prikazan u nastavku.

Kreiranje radnog slučaja:

```
LOADCASE
  NAME
    radni
  MECHANICAL
      STATIC
        LOADS
          OK
        TOTAL LOADCASE TIME
            2
        #STEPS
            100
        SOLUTION CONTROL
            MAX #INCR
                99 999
            MAX RECY
                20
            MIN RECY
                0
            NON POSITIVE DEFINIT
            PROCEED WHEN NOT CONVERGED
            FULL NEWTON - RAPHSON
            OK

         OK

      OK
```

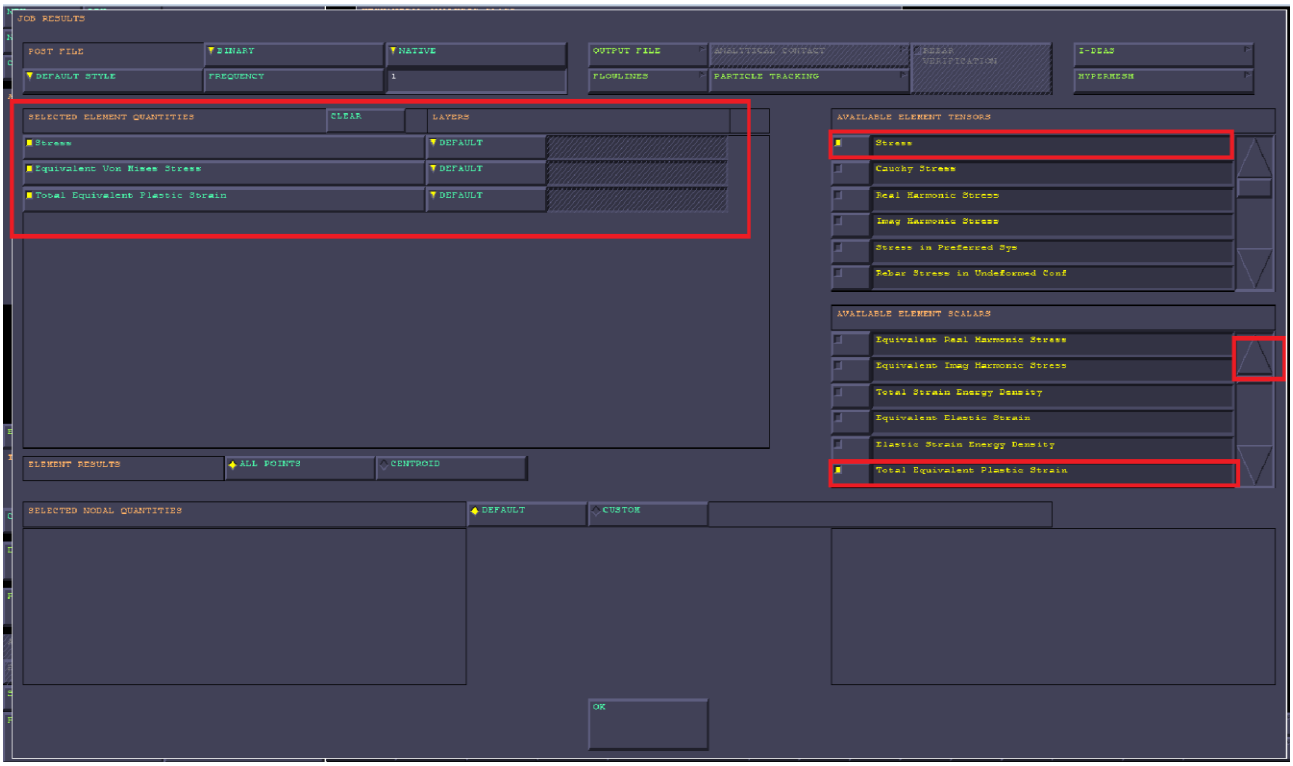
Kreiranje povratnog slučaja (vraćanje malja u početni položaj)

```
LOADCASE
  NEW
  NAME
    povratni
  MECHANICAL
      STATIC
        LOADS
          OK
        TOTAL LOADCASE TIME
            1
        #STEPS
            1
        SOLUTION CONTROL
            MAX #INCR
                  99 999
            MAX RECY
                  20
            MIN RECY
                  0
            NON POSITIVE DEFINIT
            PROCEED WHEN NOT CONVERGED
            FULL NEWTON - RAPHSON
            OK
        CONTACT
            CONTACT BODY RELEASES
            malj
        OK
```

4.1.7. Pokretanje simulacije

Završni korak kreirati je proces simulacije u kojima se zadaju slučajevi opterećenja. U glavnom izborniku odabire se funkcija *"jobs"*. Potom se otvara novi izbornik, gdje je potrebno odabrati funkciju *"mechanical"* nakon čega se otvara novi prozor u kojemu je potrebno odabrati oba slučaja opterećenja (radni i povratni). U istom prozoru potrebno je označiti funkcije *"initial loads"* i *"axisymmetric"*. Sljedeći korak odabir je funkcije *"contact control"* i označiti vrstu trenja *"coulomb"*, te pritisnuti funkciju *"ok"*. U prethodno otvorenom prozoru pod *"mechanical analysis options"* odabire se *"large displacement"*, dok pod opcijom *"rubber elasticity procedure"* potrebno je postaviti *"large strain – total lagrange"*, a pod opcijom *"plasticity procedure"* postaviti *"large strain additive"*.

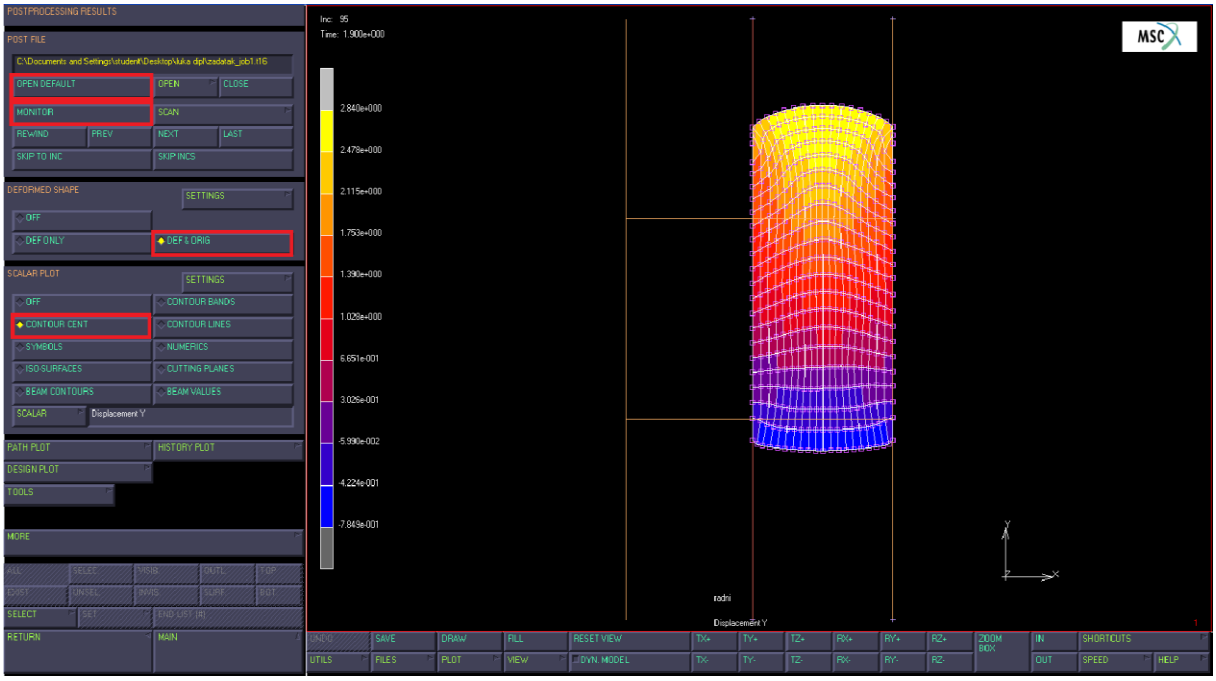
Nakon pažljivo provedenih prethodno objašnjenih koraka, na samom kraju, potrebno je odabrati što će biti prikazano u tijeku simulacije. Pod opcijom *"job results"* potrebno je odabrati *"stress"*, *"equivalent von mises stress"* i *"total equivalent plastic strain"* kao što je prikazano na slici 25.



Slika 25. Odabir željenih prikaza nakon simulacije

Kako bi se dobili rezultati koji će biti prikazani simulacijom potrebno je pod funkcijom *"jobs"* odabrati *"run"*, te pritisnuti *"submit"* i na kraju *"monitor"*. Funkcija *"monitor"* pratit će sve rezultate, te ih na taj način spremati u bazu kako bi se na kraju mogla pokrenuti simulacija nakon završene analize.

Nakon završene analize, potrebno je pokrenuti rezultate odnosno simulaciju. Pod opcijom *"results"* odabiremo *"open default"*, gdje program automatski sprema gotove procese koji će se prikazati u obliku simulacije. Nakon otvaranja dokumenta potrebno je pritisnuti funkciju "*monitor*" kako bi se simulacija pokrenula. Izgled ispitnog prstena prije i nakon deformiranja prikazan je na slici 26.



Slika 26. Ispitna epruveta prije i nakon tlačenja

Na prethodnoj slici prikazan je kao što je već gore navedeno izgled ispitnog prstena prije i nakon tlačenja. Vidljiva je razlika u vanjskom i unutarnjem promjeru. Za potrebe ovog rada, mjerena je promjena unutarnjeg promjera nakon svakog 1mm tlačenja, počevši od početne visine 7 mm (promjer jednak 10mm - početno stanje) pa sve do tlačenja na visinu 3,5mm.

Rezultati će u nastavku rada biti prikazani tablično i grafički.

4.2. Rezultati dobiveni simulacijskim programom MSC Marc Mentat

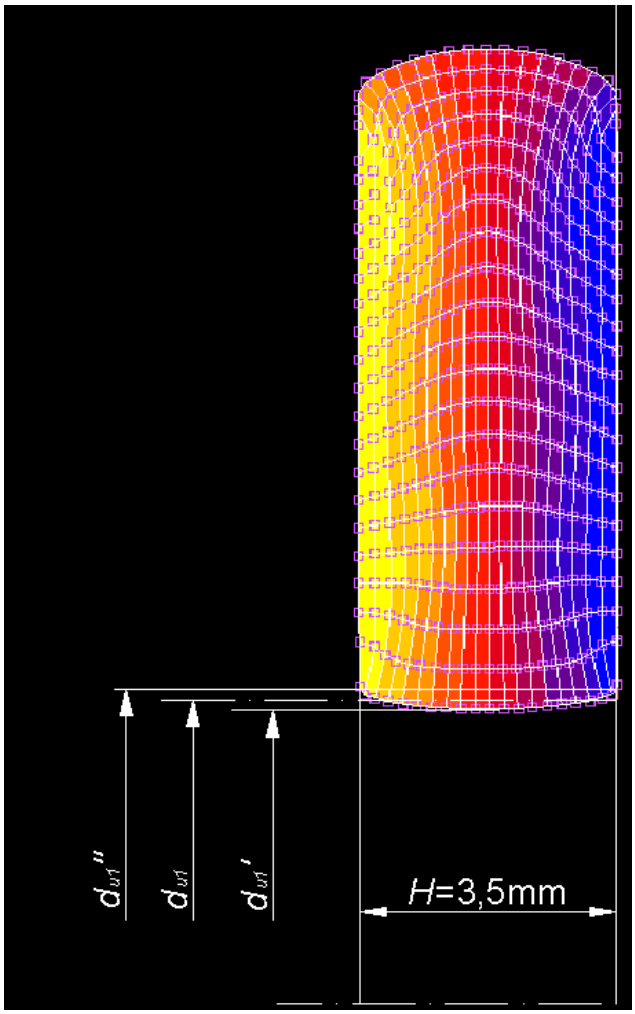
Rezultati su dobiveni mjerenjem promjene unutarnjeg promjera ovisno o visini stlačenog prstena. Prsten nakon što je stlačen u svakoj točki unutrašnjeg oboda, nema isti promjer na određenoj visini. Srednju vrijednost promjera potrebno je dobiti numerički, pomoću dane jednadžbe.

$$d_{u1=}\frac{2d_{u1}'' + d_{u1}'}{3}$$

gdje je: d_{u1}'- minimalni unutarnji promjer, mm

d_{u1}'' - maksimalni unutarnji promjer, mm

d_{u1} - srednja vrijednost unutarnjeg promjera, mm



Slika 27. Primjer mjerenja prstena

4.2.1. Tablični prikaz rezultata

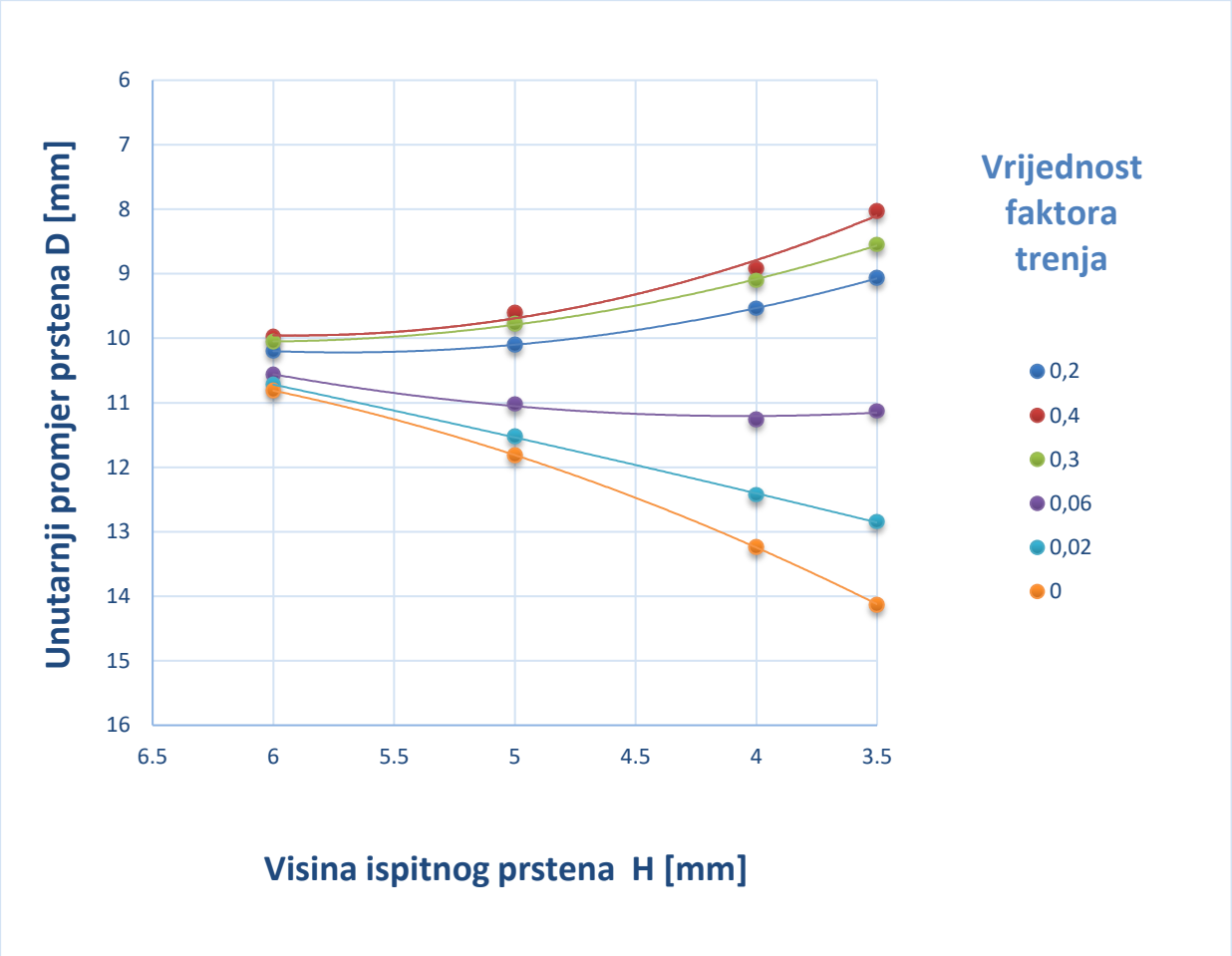
FAKTOR TRENJA 0,4								
	H=6		H=5		H=4		H=3,5	
	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''
	10,02	9,90	9,67	9,49	9,13	8,49	8,25	7,59
d_{u1}	9,98		9,61		8,92		8,03	
FAKTOR TRENJA 0,3								
	H=6		H=5		H=4		H=3,5	
	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''
	10,08	10,01	9,79	9,75	9,22	8,88	8,77	8,12
d_{u1}	10,05		9,78		9,10		8,55	
FAKTOR TRENJA 0,2								
	H=6		H=5		H=4		H=3,5	
	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''
	10,21	10,18	10,07	10,16	9,56	9,49	9,13	8,94
d_{u1}	10,20		10,10		9,54		9,07	
FAKTOR TRENJA 0,06								
	H=6		H=5		H=4		H=3,5	
	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''
	10,56	10,57	11,01	11,04	11,22	11,33	11,09	11,20
d_{u1}	10,57		11,02		11,25		11,13	
FAKTOR TRENJA 0,02								
	H=6		H=5		H=4		H=3,5	
	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''
	10,72	10,73	11,51	11,54	12,41	12,46	12,82	12,88
d_{u1}	10,72		11,52		12,43		12,84	
FAKTOR TRENJA 0								
	H=6		H=5		H=4		H=3,5	
	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''	d_{u1}'	d_{u1}''
	10,81	10,81	11,82	11,82	13,23	13,23	14,13	14,13
d_{u1}	10,81		11,82		13,23		14,13	

Tablica 8. Rezultati dobiveni simulacijama

Sve vrijednosti u tablici izražene su u milimetrima, mm.

4.2.2. Grafički prikaz rezultata

Dobiveni rezultati nakon provedenih simulacija za pet različitih faktora trenja prikazani su u dijagramu na slici 28.



Slika 28. Kalibracijski dijagram dobiven rezultatima simulacija

Na dijagramu je vidljivo da prilikom tlačenja dolazi do smanjivanja promjera uslijed djelovanja većeg faktora trenja. Suprotno tome, pri nižim vrijednostima faktora trenja vidljivo je kako unutarnji promjer raste.

Zanimljivo je primijetiti kako pri vrlo maloj vrijednosti faktora trenja u iznosu od 0,06 pri samom kraju procesa tlačenja promjer se počinje smanjivati, iako je u početku procesa imao tendenciju rasta.

4.3. Eksperimentalno određivanje faktora trenja

4.3.1. Provedba procesa u laboratoriju

Eksperimentalno određivanje vrijednosti koeficijenta faktora trenja provedeno je u laboratoriju za deformiranje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Proces tlačenja prstenova proveden je na hidrauličnoj preši prikazanoj na slici 29.



Slika 29. Hidraulička preša

Hidraulične preše kako je ranije spomenuto potrebnu silu za sabijanje ostvaruju djelovanjem tlaka na površinu.

U tablici 9 prikazane su karakteristične vrijednosti sila za određeni tlak, za korištenu hidrauličku prešu prilikom provođenja procesa u laboratoriju.

Sila, kN	Tlak, bar	Sila, kN	Tlak, bar	Sila, kN	Tlak, bar
10	7,7311	210	103,4569	410	199,1828
20	12,5174	220	108,2432	420	203,9691
30	17,3037	230	113,0295	430	208,7554
40	22,09	240	117,8158	440	213,5417
50	26,8763	250	122,6021	450	218,3279
60	31,6626	260	127,3884	460	223,1142
70	36,4488	270	132,1747	470	227,9005
80	41,2351	280	136,961	480	232,6868
90	46,0214	290	141,7473	490	237,4731
100	50,8077	300	146,5336	500	242,2594
110	55,594	310	151,3199	510	247,0457
120	60,3803	320	156,1061	520	251,832
130	65,1666	330	160,8924	530	256,6183
140	69,9523	340	165,6787	540	261,4046
150	74,7392	350	170,465	550	266,1909
160	79,5255	360	175,2513	560	270,9772
170	84,3118	370	180,0376	570	275,7634
180	89,0981	380	184,8239	580	280,5497
190	93,8843	390	189,6102	590	285,336
200	98,6706	400	194,3965	600	290,1223

Tablica 9. Potreban tlak da bi se ostvarila željena veličina sile

Treba spomenuti kako su prstenovi prije sabijanja imali iste dimenzije kao i prsten konstruiran za potrebe simulacija (H=7mm, d_u=10mm, d_v=20mm), u protivnom usporedba dobivenih rezultata ne bi imala smisla.

Svaki prsten opterećen je različitom silom upravo kako bi se dobio veći broj rezultata, odnosno različita visina i promjena unutarnjeg promjera. Proces tlačenja prikazan je na slici 30.

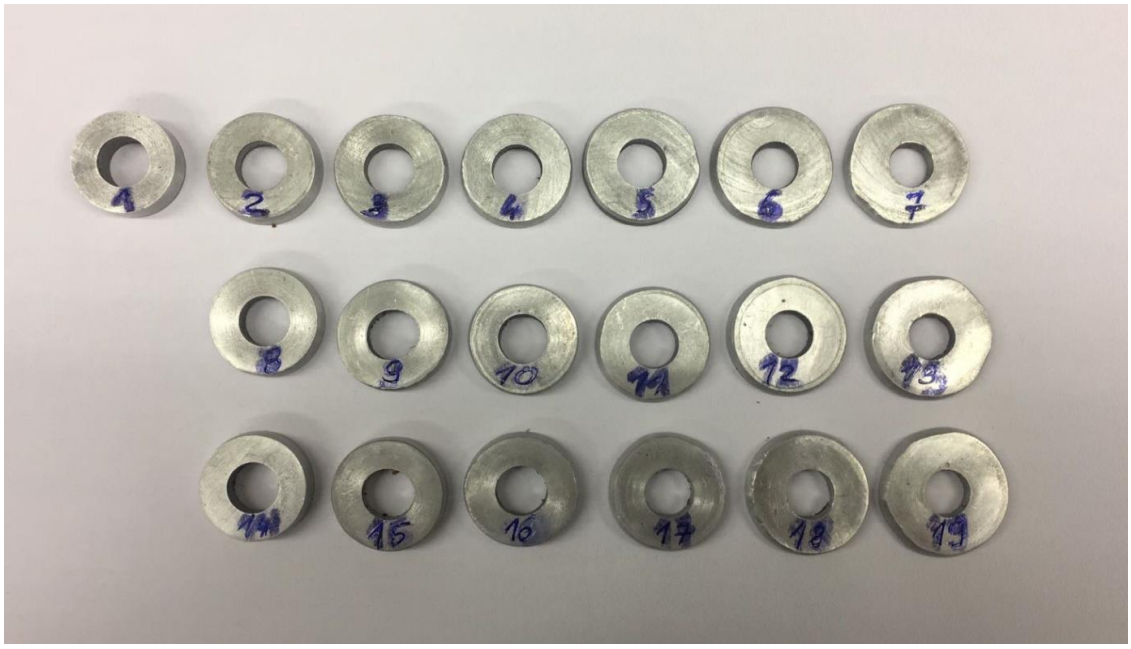


Slika 30. Proces sabijanja ispitnog prstena

Tijekom tlačenja ispitnih prstenova korištena su različita mazivna sredstva kako bi se dobili različiti rezultati i različite promjene unutarnjeg promjera. Ovisno o dobivenim rezultatima tlačenja, nakon usporedbe sa kalibracijskim dijagramom dobivenim simulacija, očitat će se vrijednost koeficijenta trenja ovisno o visini i unutarnjem promjeru.

Za potrebe ispitivanja korišteno je 18 ispitnih prstenova. Prsten broj jedan prikazuje originalni izgled te nije opterećivan na hidrauličkoj preši. Po šest prstenova korišteno je za svako mazivno sredstvo, te je svaki od spomenutih šest prstena opterećen različitom silom.

Izgled ispitnih prstenova nakon provedenog procesa sabijanja prikazan je na slici 31.



Slika 31. Ispitni prstenovi nakon tlačenja

Za mjerenje prstenova nakon završenog procesa sabijanja korišteno je pomično mjerilo prikazano na slici 32.



Slika 32. Pomično mjerilo korišteno za mjerenje stlačenih prstenova

Korišteno pomično mjerilo ručni je mjerni instrument, te je njime moguće očitati dimenzije s preciznošću do desetog dijela milimetra.

4.3.2. Rezultati dobiveni eksperimentalnim određivanjem

Rezultati dobiveni nakon mjerenja pomičnim mjerilom ne mogu se uzeti kao apsolutno točni. Moguće su pogreške mjeritelja prilikom očitanja dimenzija sa pomičnog mjerila zbog vrlo malih dimenzija.

4.3.2.1. Tablični prikaz rezultata

BEZ MAZIVA							
F	-	4,5	5	5,5	6	7	8
H	7	5,4	5,15	5	4,55	4	3,7
d_{u1}'	10	9,8	9,8	10	9,85	9,35	8,85
d_{u1}''	10	9,7	10	9,9	9,35	8,9	8,4
d_{u1}	10	9,77	9,87	9,97	9,68	9,2	8,7
ULJE							
F	-	4,5	5	5,5	6	7	8
H	7	5,5	5,2	4,9	4,65	4,2	3,7
d_{u1}'	10	9,95	10,2	9,9	9,9	9,5	9,5
d_{u1}''	10	9,9	10	9,65	9,5	8,9	8,6
d_{u1}	0	9,93	10,13	9,82	9,77	9,3	9,2
GRAFIT + MAST							
F	-	4,5	5	5,5	6	7	8
H	7	5,85	5	4,85	4,55	4	3,5
d_{u1}'	10	10	10,2	10,4	10	10	9,3
d_{u1}''	10	9,8	10,25	10,15	9,6	9,9	9,1
d_{u1}	0	9,93	10,22	10,32	9,87	9,97	9,23

Tablica 10. Rezultati dobiveni mjerenjem nakon procesa tlačenja u laboratoriju

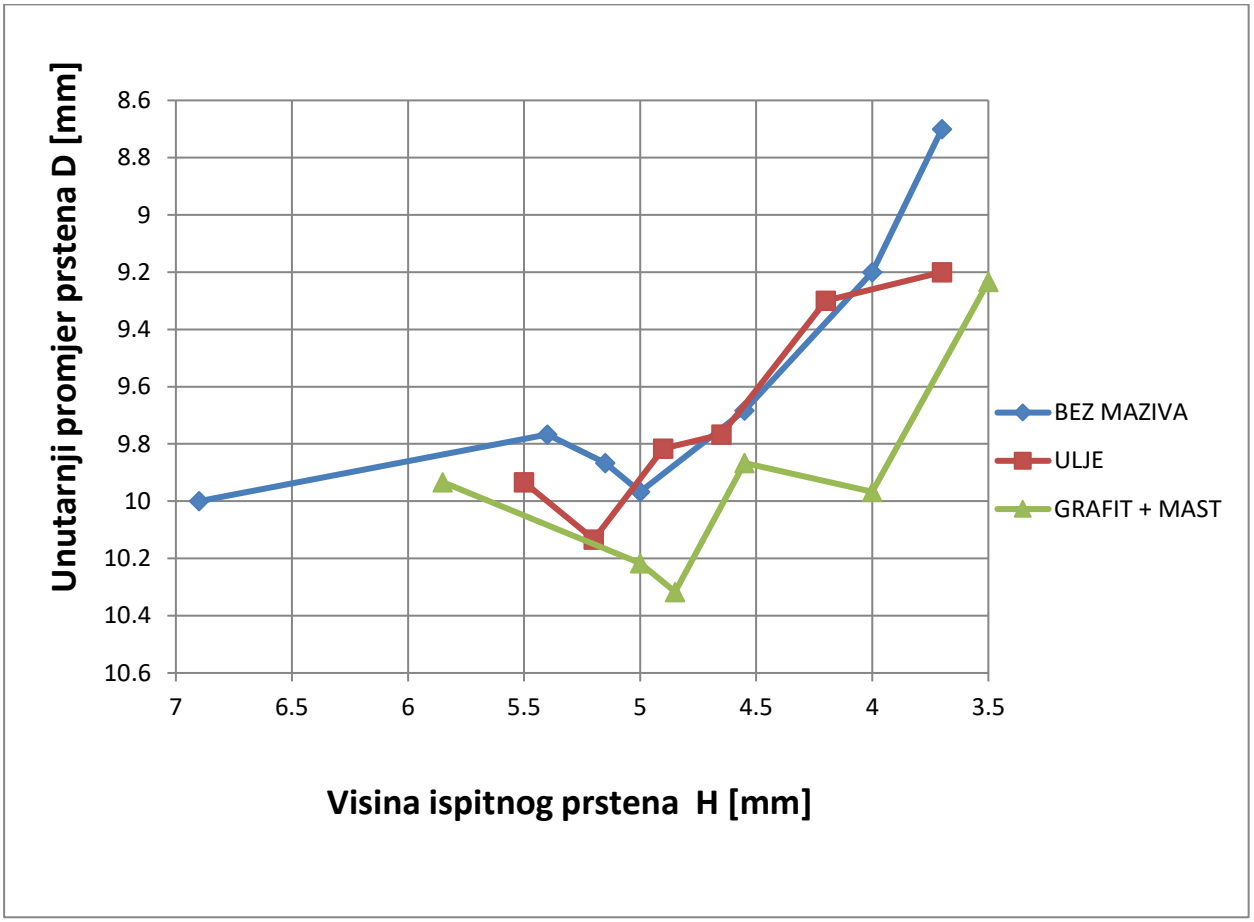
Sila kojom je prsten opterećen izražena je u [kN]

Kao što je ranije spomenuto, sabijanje je provedeno sa tri vrste mazivnih sredstava:

- bez maziva
- ulje
- smjesa masti i grafita

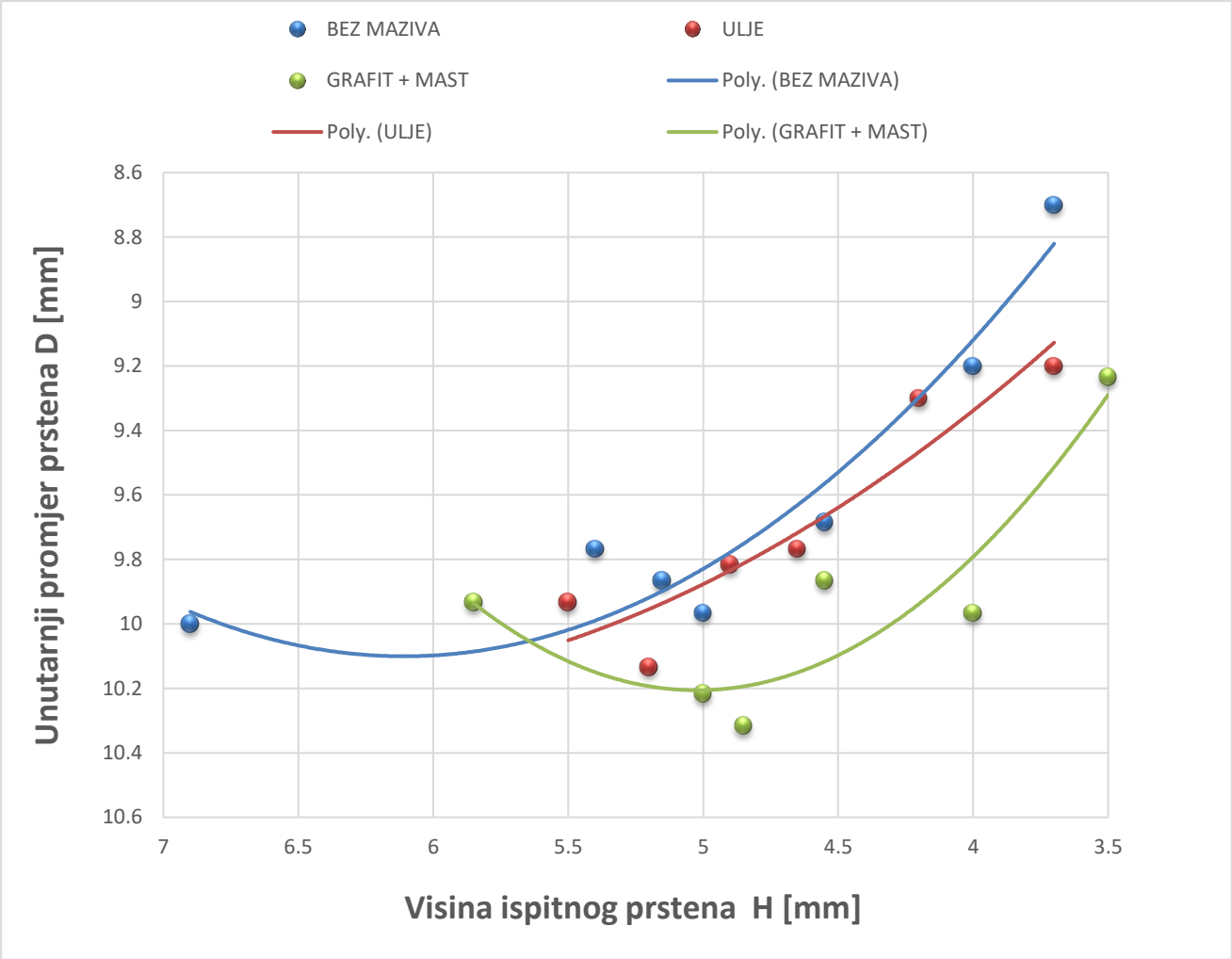
4.3.2.2. Grafički prikaz rezultata

Rezultati su prikazani u dva dijagrama. Prvi dijagram sadržava krivulje koje prolaze točno kroz točke koje su dobivene mjerenjem, dok su u drugom dijagramu prikazane krivulje dobivene aproksimacijom zadanih točaka.



Slika 33. Dijagram sa rezultatima dobivenim mjerenjem

Iz dijagrama na slici vidljiva su veća odstupanja u vrijednostima, što se može pridodati greškama prilikom očitavanja mjera sa pomičnog mjerila. Zato će u nastavku biti prikazani rezultati dobiveni aproksimacijom zadanih točaka (slika 34).



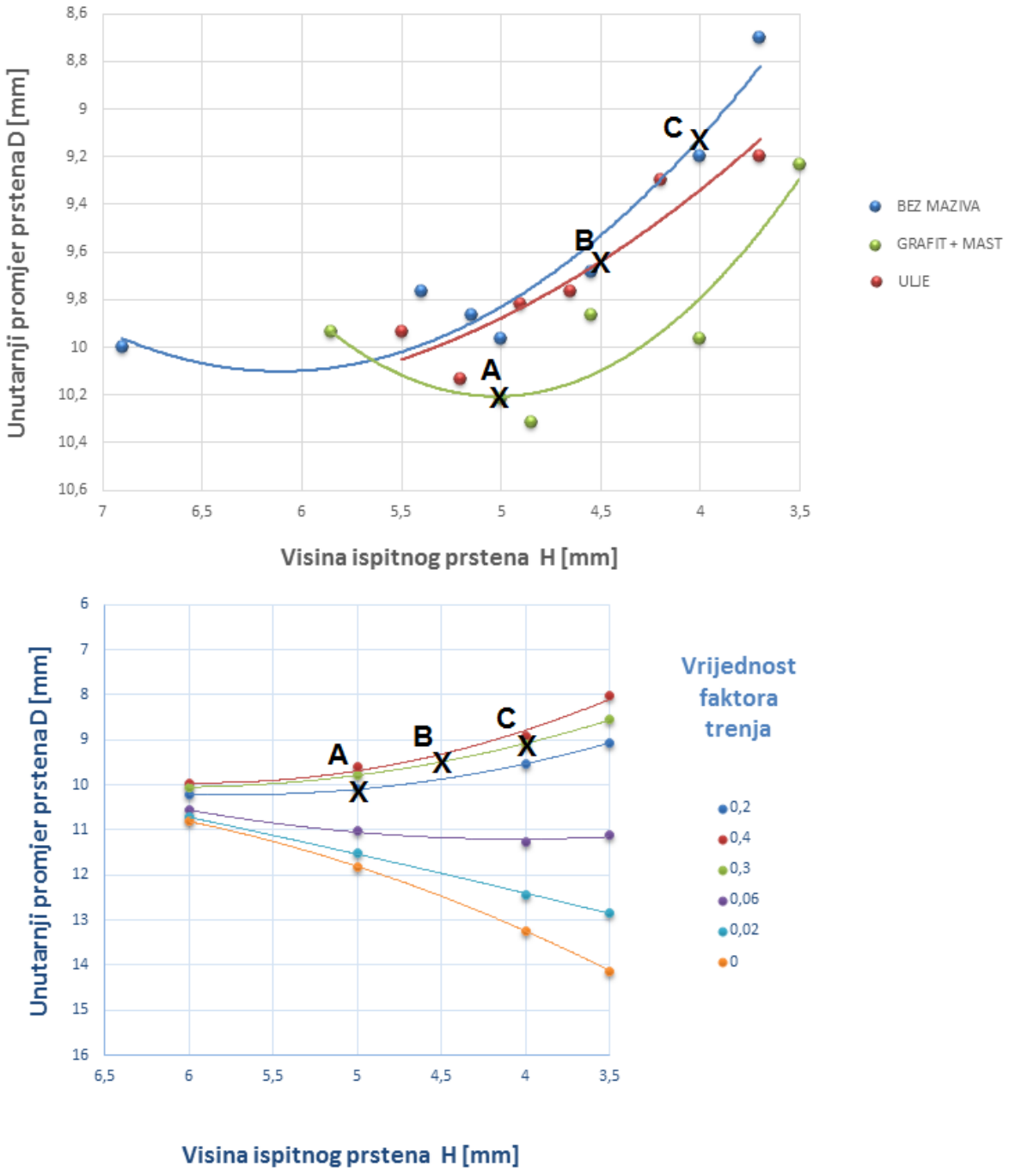
Slika 34. Aproksimacija dobivenih rezultata

Iz prikazanog dijagrama vidi se kako prilikom korištenja ulja kao mazivnog sredstva najmanje su razlike u promjeru prilikom procesa tlačenja.

Provođenja procesa tlačenja prstena bez korištenja mazivnog sredstva, kao što se može vidjeti u dijagramu daje najveći raspon vrijednosti unutarnjeg promjera.

Primjer tlačenja korištenjem smjese grafita i masti kao mazivnog sredstva jasno prikazuje u početku procesa rast vrijednosti unutarnjeg promjera da bi nakon određenog vremena promjer se počeo vidljivo smanjivati.

4.4. Usporedba rezultata



Slika 35. Usporedba dijagrama i određivanje koeficijenta faktora trenja

Iz usporedbe dvaju dobivenih dijagrama, prvog (kalibracijskog) koji je dobiven simulacijama, te drugog dobivenog eksperimentalnim putem može se odrediti iznos faktora trenja (slika 35).

Točka A

Vidljivo je kako u procesu koji se provodi sa smjesom grafita i masti kao mazivnim sredstvom u trenutku visine prstena 5mm, unutarnji promjera iznosi ≈ 10,2mm, što prema kalibracijskom dijagramu znači da u tom trenutku faktor trenja iznosi 0,2.

Točka B

Vidljivo je kako u procesu koji se provodi sa uljem kao mazivnim sredstvom u trenutku visine prstena 4,5mm, unutarnji promjera iznosi ≈ 9,65mm što prema kalibracijskom dijagramu znači da u tom trenutku faktor trenja iznosi 0,3.

Točka C

Vidljivo je kako u procesu koji se provodi bez maziva u trenutku visine prstena 4mm, unutarnji promjera iznosi ≈ 9,1mm, što prema kalibracijskom dijagramu znači da u tom trenutku faktor trenja iznosi 0,3.

5. ZAKLJUČAK

Utjecaj faktora prilikom oblikovanja metala deformiranjem vrlo je značajan. Kontaktno trenje uzrokuje zaostala naprezanja, zahtjeva veći utrošak rada, te samim time smanjuje vijek trajanja alata. Poznavanje vrijednosti koeficijenta trenja uvelike bi olakšalo provođenja procesa oblikovanja deformiranjem. Vrlo je teško znati točan iznos koeficijenta trenja prije same obrade, zbog toga je teže pronaći način i metodu koja će dati najbliže vrijednosti djelujućeg koeficijenta trenja.

Nekoliko je načina izračunavanja vrijednosti trenja. Može se računati indirektno, izračunavanjem iz poznatih izraza, no takav način rezultira brojnim aproksimacijama. Drugi način je eksperimentalni, no rezultati dobiveni takvim istraživanjem vrijede samo kada su uvjeti procesa jednaki ili slični uvjetima u kojima je proveden sam eksperiment.

Metoda sabijanja prstena jedna je od najpoznatijih metoda za eksperimentalno određivanje vrijednosti koeficijenta trenja. Potrebno je poznavati kalibracijski dijagram, te nakon provedenog eksperimentalnog postoji mogućnost očitanja vrijednosti koeficijenta trenja.

Eksperimentalnim dijelom ovog rada detaljno se pojasnio postupak dobivanja kalibracijskog dijagrama pomoću 2D simulacijskog programa. Postupak sabijanja ispitnog prstena proveden je za pet različitih vrijednosti koeficijenta trenja, te su za svaki od faktora dobivene krivulje koje prikazuju promjenu unutarnjeg promjera ovisno o promjeni visine ispitnog prstena. Nakon prikaza rezultata pomoću krivulja, dobiven je potrebni kalibracijski dijagram. Provedba procesa sabijanja prstenova u laboratoriju, pokazala je da prilikom korištenja različitih mazivnih sredstava dolazi do drugačije promjene unutarnjeg promjera za iste korištene sile. Upravo to, razlog je djelovanja različitih vrijednosti koeficijenta trenja. Mjerenjem prstenova pomoću pomičnog mjerila dolazi se do rezultata koji se ne mogu gledati kao apsolutno točni zbog mogućnosti pogreške samog mjeritelja. Dobivene rezultate potrebno je aproksimirati kako bi se dobio dijagram, koji bi mogao poslužiti za usporedbu sa kalibracijskim dijagramom dobivenim simulacijama.

Usporedbom dvaju dobivenih dijagrama pokazalo se da nakon provedenog eksperimentalnog dijela, te uz poznavanje kalibracijskog dijagrama, možemo sa dovoljnom pouzdanošću odrediti vrijednost koeficijenta trenja. Ovakvi rezultati govore kako je metoda sabijanja prstena još uvijek dovoljno pouzdana kako bi se smanjilo štetno djelovanje trenja u procesima oblikovanja metala deformiranjem.

LITERATURA

[1] D. Ivičić, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009

[2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Trenje, 27.11.2017

[3] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Metalurški fakultet Sisak, 2014

[4] M. Dundjer, Trenje trošenje i podmazivanje

[5] A. Povrzanović, Odabrana poglavlja obrade metala deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 1996

[6] Podloge za predavanje, Obradni strojevi, deformiranje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[7] Deformacijski strojevi i postupci, Mehaničke i hidraulične preše, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017

[8] D. Rezo, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2017

[9] http://www.maziva.org/izbor-maziva/mazive-masti/ 27.11.2017

[10] D. Vilotić, Hidraulične prese i čekići, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 2013

[11] D. Ljubas, Gorivo i mazivo – Podloge s predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012

[12] R. Chandramouli, Associate Dean-Research, Thermal effects and friction in forming, SASTRA University, Thanjavur

[13] https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05340G_Sample.pdf 27.11.2017

PRILOZI

I. Krivulja plastičnog tečenja materijala Al 99,5

SNIMANJE KRIVULJA PLASTIČNOG TEČENJA MATERIJALA

ADB - AWF	VDI - radni list Krivulja plastičnog tečenja* aluminija **Al 99.5**	VDI 5 - 3200 D 1 (Listopad 1954)

čisti aluminij 99,5
toplo prešan
toplo prešan i hladno provučen $\varphi \approx 0{,}4$
dodatno žaren

Analiza kemijskog sastava:

0.01% Cu	0.10% Si
0.01% Mg	0.16% Fe
0.01% Mn	0.03% Zn

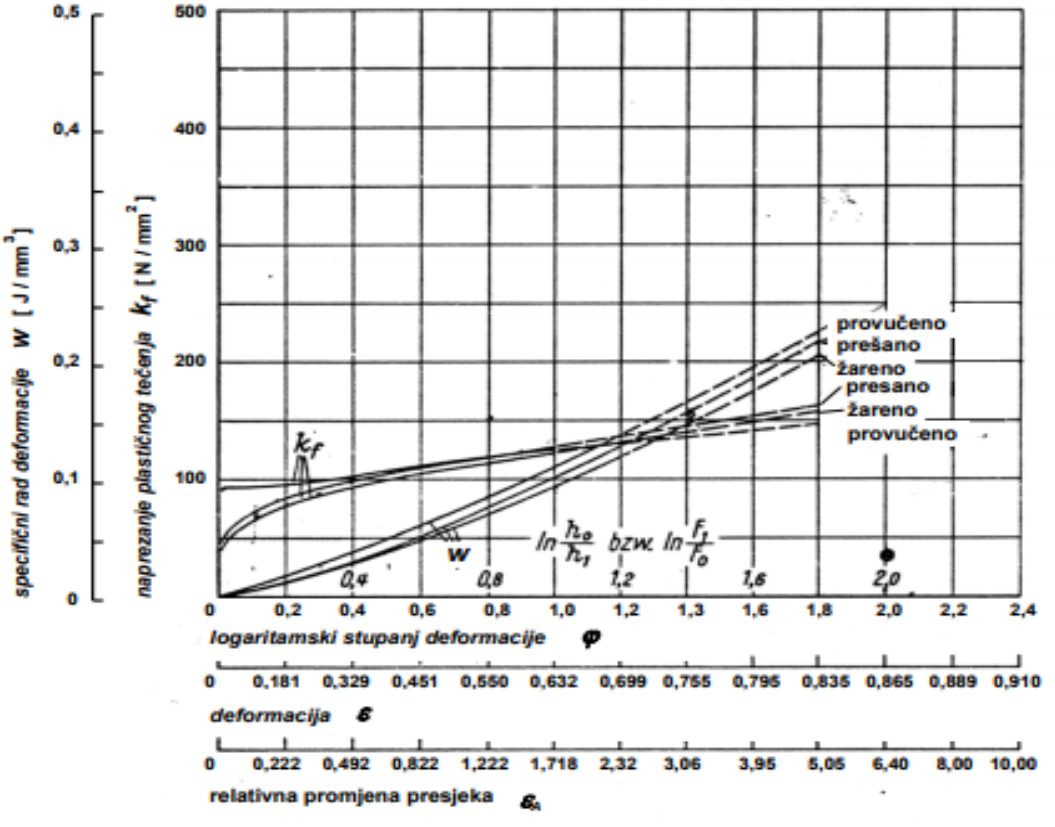
Mehanička svojstva

		prešano	provučeno	žareno	
granica proporcionalnosti	$R_{0,2}$ =	40	cca. 90	cca. 30	[N / mm^2]
vlačna čvrstoća	R_M =	70	95	65	[N / mm^2]
prijelomna istezljivost	δ_5 =	41	20	50	%
prijelomna kontrakcija	ψ =	92	92	91	%

Struktura

Uzdužni presjek 200 x





* Krivulje plastičnog tečenja snimljene su tlačnim pokusom, prema navodu u radnome listu VDI 5 - 3200.