Ispitivanje utjecaja maziva u procesu dubokog vučenja

Vidović, Denis

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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:235:558683

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:
Doc. dr. sc. Zdenka Keran, dipl. ing. Denis Vidović

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Student:
Denis Vidović

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne 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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Denis Vidović** Mat. br.: 0035205108

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Ispitivanje utjecaja maziva u procesu dubokog vučenja

Naslov rada na engleskom jeziku: Lubricant impact testing in the deep drawing process

Opis zadatka:

Budući da u većini postupaka oblikovanja metala deformiranjem postojanje kontaktnog trenja ima neželjene posljedice, od iznimne je važnosti dobro poznavanje njegovog utjecaja u pojedinim fazama oblikovanja obratka te predviđanje kritičnih točaka u svakom proizvodnom procesu.
U sklopu završnog rada potrebno je proučiti i opisati modele trenja u procesima oblikovanja deformiranjem, objasniti utjecaj maziva u specifičnim procesima te razlikovati ulogu maziva u različitim tipovima procesa oblikovanja. Posebnu pažnju potrebno je obratiti na postupak osnosimetričnog dubokog vučenja čeličnog lima u jednoj fazi te opisati općeniti utjecaj trenja na povećanje sile oblikovanja u postupcima dubokog vučenja. Nadalje, potrebno je razraditi plan pokusa za ispitivanje utjecaja najmanje tri vrste maziva namijenjenih dubokom vučenju čeličnih limova te provesti ispitivanje. Specificirati tehnološke uvjete u kojima se postupak ispitivanja provodi. Rezultate ispitivanja potrebno je valorizirati i dati preporuku za korištenje određenog tipa maziva u specifičnim tehnološkim uvjetima.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:
Doc. dr. sc. Zdenka Keran

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

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

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Zdenki Keran na stručnoj pomoći prilikom izrade završnog rada i tijekom dosadašnjeg studija, a prije svega na ukazanom razumijevanju i pruženoj pomoći.

Zahvaljujem se osoblju iz tvrtke ABC maziva, a osobito dipl. ing. Hrvoju Zidaru na ustupljenim uzorcima maziva i na nesebičnoj pomoći tijekom izrade završnog rada.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na razumijevanju i pruženoj potpori tijekom dosadašnjeg studiranja.

Denis Vidović

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
1.1 Razvoj oblikovanja metala deformiranjem 1
1.2. Važnost trenja u oblikovanju deformiranjem 2
2. TRENJE 3
2.1. Teorije i modeli trenja 4
2.1.1. Teorije trenja 4
2.1.2. Modeli trenja 5
2.2 Sila trenja 7
2.3. Faktor trenja 8
2.3.1. Rangiranje trenja po Kloss-u 8
2.3.2. Postupak određivanja faktora trenja 9
2.4. Utjecajni čimbenici na trenje u postupcima oblikovanja metala deformiranjem 11
2.5. Trošenje alata u procesima oblikovanja metala deformiranjem uslijed djelovanja trenja 12
2.5.1. Abrazija 12
2.5.2. Adhezija 13
2.5.3. Deformacija 13
2.5.4. Umor površine 14
3. PODMAZIVANJE U POSTUPCIMA OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM 15
3.1. Podmazivanje u procesima valjanja metala u toplom i hladnom stanju 15
3.2. Podmazivanje kod provlačenja žica, cijevi i profila 16
3.3. Podmazivanje kod oblikovanja metala istiskivanjem 17
3.4. Podmazivanje kod oblikovanja metala kovanjem u ukovnju 19
3.5. Podmazivanje kod oblikovanja metala rotacijskim optiskivanjem 20
3.6. Podmazivanje u procesima oblikovanja metala postupkom dubokog vučenja 20
3.6.1. Utjecaj trenja na silu dubokog vučenja 22

4. MAZIVA U POSTUPCIMA OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM 26
4.1. Viskoznost 26
4.1.1. Dinamička i kinematička viskoznost 26
4.1.2. Ovisnost viskoznosti o temperaturi 27
4.2. Sistematizacija maziva 28
4.2.1. Maziva koja se miješaju s vodom 29
4.2.2. Maziva koja se ne miješaju s vodom 29
4.2.3. Kruta maziva 29
4.2.4. Filmovi (folije) i lakovi 29
4.2.5. Soli i stakla 30
5. PLANIRANJE PROCESA ISPITIVANJA TE ISPITIVANJE UTJECAJA 3 VRSTA MAZIVA U POSTUPKU DUBOKOG VUČENJA 31
5.1. Maziva korištena za ispitivanje 31
5.1.1. Mazivo Iloform TDN 81 32
5.1.2. Maziva Magna 32
5.2. Stroj na kojem je ispitivanje provedeno 33
5.3. Plan ispitivanja i tehnološki uvjeti ispitivanja 34
5.4. Pretpostavka ponašanja maziva u procesu dubokog vučenja 34
5.5. Rezultati ispitivanja i preporuke 34
6. ZAKLJUČAK 36
7. LITERATURA 37
8. PRILOZI 39

POPIS SLIKA

Slika 1. Fritzov bat [12]…….1

Slika 2. Moderno industrijsko postrojenje za oblikovanje metala deformiranjem [13]……2

Slika 3. Trenje na ravnoj podlozi [9]...……...3

Slika 4. Prikaz mikroneravnina [9]……...4

Slika 5. Suho trenje [14]……5

Slika 6. Potpuno hidrodinamičko trenje [15]……6

Slika 7. Mješovito trenje [15]…….6

Slika 8. Granično trenje [15]……7

Slika 9. Sabijeni prsten s dobrim podmazivanjem (nizak faktor trenja) [16]...……9

Slika 10. Sabijeni prsten s lošim podmazivanjem (visok faktor trenja) [16]……9

Slika 11. Kalibracijski dijagram za određivanje faktora trenja [1]..……10

Slika 12. Schmaltzova shema [1]...……..12

Slika 13. Proces abrazije [17]……..12

Slika 14. Proces adhezije [6]...……13

Slika 15. Deformacija površine uslijed djelovanja sile [6]..……13

Slika 16. Umor površine [18]……..…14

Slika 17. Postupak valjanja [19]……..15

Slika 18. Provlačenje cijevi [20]……..16

Slika 19. Proces istiskivanja [21]……18

Slika 20. Primjer slobodnog kovanja [22]……...……19

Slika 21. Kovanje u ukovnju [23]……19

Slika 22. Prikaz pojedinih faza dubokog vučenja [24]……21

Slika 23. Shema napregnutog stanja u procesu dubokog vučenja [2]……..25

Slika 24. Ovisnost viskoznosti o temperaturi [25]……...27

Slika 25. Kretanje indeksa viskoznosti različitih vrsta maziva [26]……28

Slika 26. Korištena maziva……...31

Slika 27. Stroj za duboko vučenje……...33

Slika 28. Grafički prikaz rezultata ispitivanja maziva……...…..35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rangiranje trenja po Kloss-u…….8

Tablica 2. Utjecaj faktora kontaktnog trenja……...….25

Tablica 3. Karakteristična fizikalna svojstva maziva Iloform TDN 81……...32

Tablica 4. Karakteristična fizikalna svojstva maziva Magna 2 i Magna 220……..32

Tablica 5. Osnovne karakteristike stroja……..33

Tablica 6. Rezultati ispitivanja maziva……34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	aktivna sila
F_t	N	sila trenja
G	N	težina
N	N	reakcija podloge
F_N	N	normalna sila
μ	-	faktor trenja
h_0	mm	početna visina prstena
d_{u0}	mm	početni unutarnji promjer prstena
d_{v0}	mm	početni vanjski promjer prstena
m	-	koeficijent redukcije
D	mm	promjer posude
σ_r	N/mm^2	radijalno naprezanje
k_f	N/mm^2	naprezanje plastičnog tečenja
D_0	mm	promjer rondele
D_m	mm	promjer matrice
σ_{tr}	N/mm^2	naprezanje uslijed trenja tlačnog prstena
s	mm	debljina lima
F_{pr}	N	sila tlačnog prstena
p	N/mm^2	pritisak tlačnog prstena
σ_{sav}	N/mm^2	naprezanje uslijed savijanja
r_m	mm	radijus matrice
F_{dv}	N	sila dubokog vučenja
D_1	mm	promjer posude nakon postupka

σ_{uk}	N/mm^2	ukupno naprezanje u materijalu
ν	m^2/s	kinematička viskoznost
μ	Pas	dinamička viskoznost
ρ	kg/m^3	gustoća fluida

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je ispitivanje utjecaja maziva na silu oblikovanja u procesu dubokog vučenja. Zbog velikog utjecaja trenja na parametre procesa u procesima oblikovanja deformiranjem, potrebno je odabrati optimalno mazivo kako bi negativan utjecaj trenja sveli na minimum. Pomoću dodatne literature i dosad stečenog znanja tokom studija proučeni su modeli trenja koji se javljaju u procesima oblikovanja te faktori koji na to trenje utječu. Istraženi su mogući mehanizmi trošenja uslijed negativnog djelovanja trenja. Također su objašnjeni utjecaji trenja u specifičnim procesima oblikovanja deformiranjem s naglaskom na utjecaj u procesu dubokog vučenja kod kojeg je i faktor trenja doveden u izravnu vezu s silom dubokog vučenja. Navedena je sistematizacija postojećih maziva korištenih u postupcima oblikovanja deformiranjem. Temelj rada je ispitivanje utjecaja tri različita maziva u procesu dubokog vučenja te su dobiveni rezultati prikazani tablično i grafički te su shodno tome doneseni određeni zaključci i dane su preporuke.

Ključne riječi: trenje, trošenje, postupci oblikovanja deformiranjem, duboko vučenje, mazivo

SUMMARY

The subject of this final work is to examine the impact of lubricant on molding force in the deep drawing process. Since the influence of friction on parameters in metal forming processes is high, it is necessary to select the optimal lubricant to minimaze negative effect of friction. With the help of additional literature and the knowledge gained so far during studies, model of friction that occur in the real world and the factors that influence this friction were described. Possible wear mechanisms due to the negative effects of friction have also been studied. The effects of friction in specific metal forming processes are explained, with an emphasis on the influence in the deep drawing process where the friction factor have also been directly related to the deep drawing force. Systematization of existing lubricants used in metal forming processes is given. The basis of the work is to examine the effect of three different lubricants in the deep drawing process, and the results are shown in table and diagram, and some conclusions have been made and some recommendations are given based on test results.

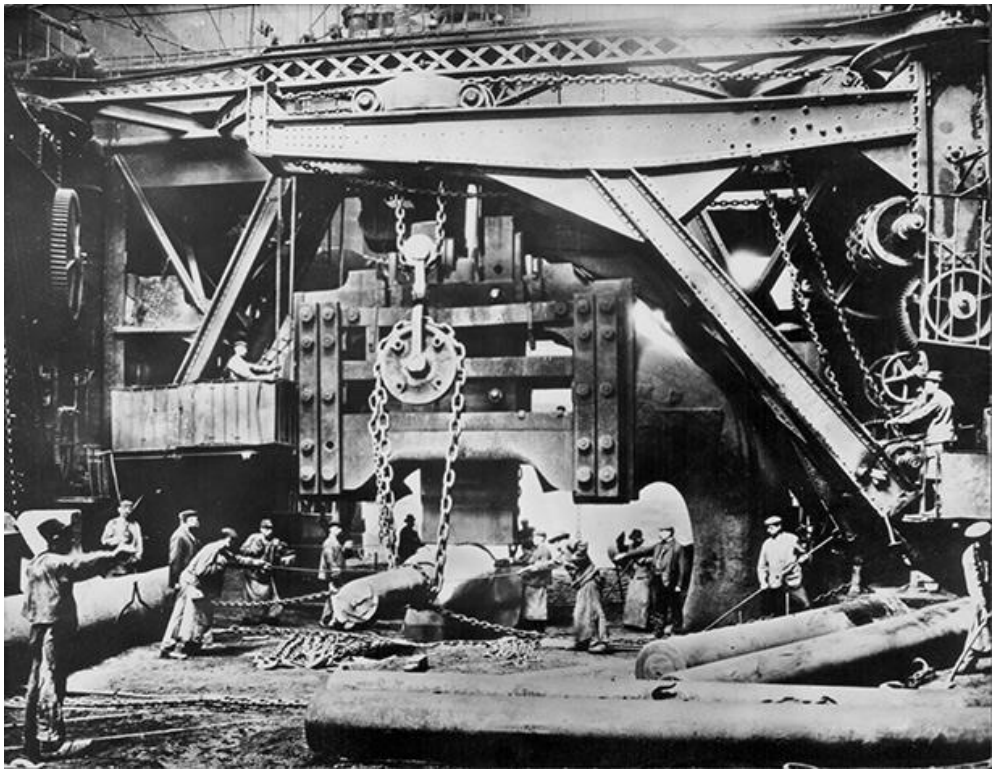
Key words: friction, wear, metal forming processes, deep drawing, lubricant

1. UVOD

Postupci oblikovanja deformiranjem su skup postupaka (kovanje, štancanje, duboko vučenje, tiskanje, provlačenje, valjanje…) kojima se izrađuju proizvodi ili poluproizvodi pomoću njihove plastične deformacije. Mogućnost plastičnog oblikovanja materijala najviše ovisi o mehaničkim svojstvima tog materijala. Najveće prednosti oblikovanja deformiranjem su visoka dimenzijska točnosti i kvaliteta površine, visoka produktivnost, ujednačena pa čak i poboljšana mehanička svojstva materijala itd. Zbog svih ovih razloga postupci oblikovanja deformiranjem široko su rasprostranjeni u svim granama industrije, a njihov značajniji napredak započinje dolaskom industrijalizacije sredinom 19. stoljeća.

1.1 Razvoj oblikovanja metala deformiranjem

Postupci oblikovanja metala deformiranjem sastavni su dio industrije od njenih najranijih početaka. Ljudi su još u davnim vremenima, otprilike 4000. godine prije Krista oblikovali metal u oružja, oruđe, nakit… Koristili su kamenje ili primitivne čekiće kao batove. U srednjem vijeku dolazi do napretka u ovom području jer su ljudi uz riječna područja počeli graditi strojeve pogonjene vodom za oblikovanje metala. Otkrićem parnog stroja razvoj industrije i strojeva se nastavlja. Parom pogonjeni batovi mogli su postizati relativno velike sile pa su tako mogućnosti oblikovanja metala bile sve veće. Najveći parni bat u ona vremena bio je Fritzov bat koji je koristila tvrtka Krupp Company od 1861. godine. [7]



Slika 1. Fritzov bat [12]

Daljnjim razvojem industrije, osobito automobilske, dolazi do snažnog razvoja sustava oblikovanja metala deformiranjem pa tako danas posjedujemo kompjuterizirane, robotizirane i automatizirane strojeve koji omogućuju velikoserijsku proizvodnju proizvoda. Svakodnevno smo okruženi proizvodima koji su proizvedeni ili su barem neki njihovi dijelovi proizvedeni postupcima oblikovanja deformiranjem. Današnja industrija teži što bržoj, jeftinijoj, kompleksnijoj te fleksibilnijoj proizvodnji što veće količine proizvoda. Kako bi bili konkurentni na tržištu moramo što je više moguće optimizirati naše procese. To zahtjeva detaljno poznavanje svakog procesa oblikovanja deformiranjem kako bi mogli optimizirati njegove parametre i maksimalno iskoristiti naše strojeve, potrošne sirovine i radnu snagu. Također, ukoliko želimo težiti takvoj proizvodnji moramo osigurati visoku pouzdanost u radu našeg sustava. Trošenje alata je najčešći uzrok zastoja proizvodnje, a to trošenje alata je uvelike posljedica trenja. [7]

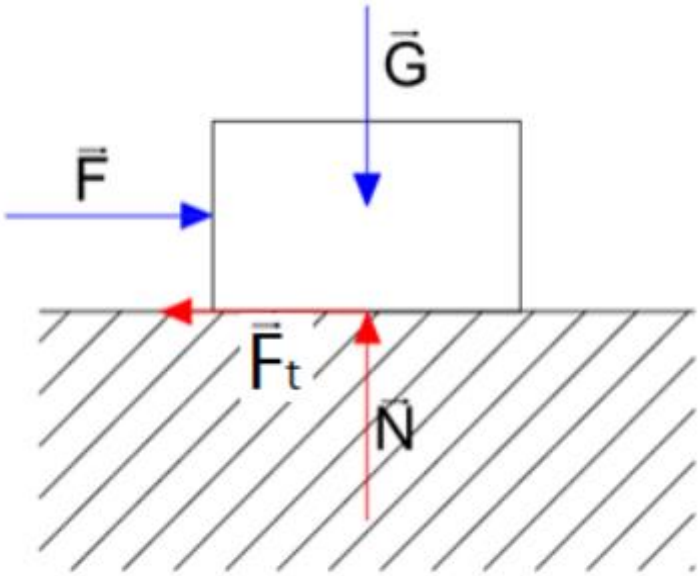
Slika 2. Moderno industrijsko postrojenje za oblikovanje metala deformiranjem [13]

1.2. Važnost trenja u oblikovanju deformiranjem

Trenje je pojava koja je svugdje oko nas, pa tako i u svakom procesu oblikovanja deformiranjem. Ono većinom ima neželjene posljedice za naš materijal obratka i alata. Veoma je važno dobro upoznati utjecaj trenja u svakom procesu i u svakoj fazi procesa kako bi dobili mogućnost svođenja njegovih neželjenih posljedica na minimum. Odabirom optimalnog maziva, brzine deformacije te stupnja deformacije značajno možemo utjecati na pojavu i iznos trenja u procesu. Smanjenjem trenja, proporcionalno smanjujemo i iznos deformacijske sile i deformacijskog rada nužnog za savladavanje tog trenja. Posljedica toga je duži radni vijek alata, manji utrošak energije i veća pouzdanost sustava.

2. TRENJE

Trenje se definira kao sila ili otpor koja se suprotstavlja relativnom kretanju čvrstih tijela u kontaktu. Ono djeluje paralelno s dodirnim površinama i djeluje u smjeru suprotnom od smjera relativnog kretanja. Trenje je posljedica kemijskog i mehaničkog međudjelovanja tvari u dodiru. Razlikujemo trenje mirovanja (statičko trenje) koje se javlja kad tijela koja su u međusobnom kontaktu miruju te trenje gibanja (kinematičko trenje) koje se javlja kad se tijela u međusobnom kontaktu relativno gibaju. Kinematičko trenje može biti trenje klizanja, trenje kotrljanja ili otpor fluida gibanju čvrstih tijela (viskoznost). Kada se površine koje su u kontaktu relativno gibaju u suprotnim smjerovima, dio mehaničke energije koja je unesena u sustav djelovanjem trenja pretvara se u toplinu. Posljedica toga je trošenje obje površine. Sila trenja je proporcionalna o normalnoj sili na podlogu, ta sila može biti samo težina tijela, a može biti i zbroj težine te neke druge sile koja se javlja u sustavu. Sila trenja proporcionalna je također i faktoru trenja koji je funkcija hrapavosti površina, njihovom kemijskom sastavu (kompatibilnost materijala), podmazanosti površina (ukoliko postoji) te o načinu gibanja. Faktor trenja kod mirovanja je najveći, kod klizanja je nešto manji, a najmanji je kod gibanja kotrljanjem. [9]



Slika 3. Trenje na ravnoj podlozi [9]

Gdje su:

F- aktivna sila, N

F_t- sila trenja, N

G- težina, N

N- reakcija podloge, N

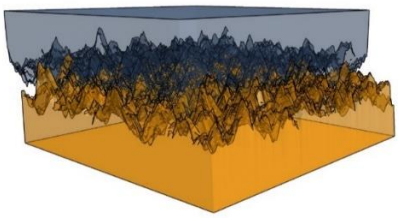
2.1. Teorije i modeli trenja

Pošto je trenje pojava koja ovisi o mnogo faktora, tako je i određeno nekoliko modela trenja koji se mogu pojaviti tokom eksploatacije sustava. Od velike je važnosti poznavati sve te modele trenja jer je to preduvjet za određenu praktičnu intervenciju kada želimo smanjiti silu trenja i trošenje. Postoje četiri teorije trenja pomoću kojih opisujemo pojavu trenja općenito. [2]

2.1.1. Teorije trenja

2.1.1.1. Geometrijski pristup teoriji trenja

Geometrijski pristup trenje objašnjava na osnovi postojanja mikroneravnina (udubljenja i ispupčenja) na tarnim površinama frikcijskog para. One povećavaju ukupnu kontaktnu površinu frikcijskog para te pružaju otpor međusobnom gibanju tog para. [2]



Slika 4. Prikaz mikroneravnina [9]

2.1.1.2. Molekularni pristup teoriji trenja

Molekularni pristup teoriji trenja objašnjava trenje kao posljedicu molekularnog privlačenja sudionika frikcijskog para. Za relativno kretanje članova frikcijskog para potrebno je kidanje međumolekularnih veza za što je naravno potrebna određena sila. [2]

2.1.1.3. Deformacijski pristup teoriji trenja

Deformacijski pristup teoriji trenja zasniva se na činjenici postojanja neravnina na površinama frikcijskog para. Uslijed međusobnog kontakta članova frikcijskog para, deformira se površina mekšeg člana, prvo elastično, a zatim i plastično. Uslijed velikih tlakova može doći i do stvaranja međusobnih spojeva ispupčenja na površinama za čije je raskidanje potrebna određena sila. [2]

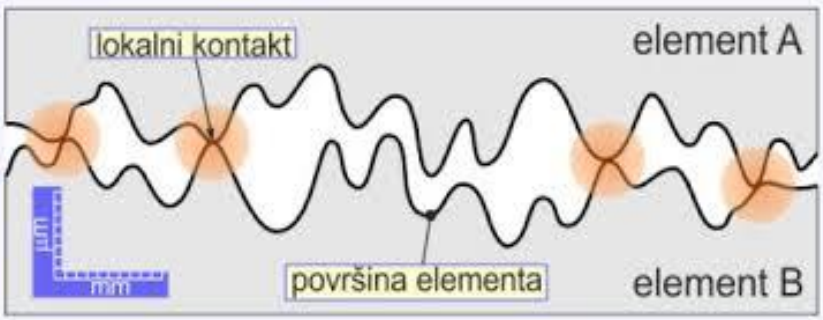
2.1.1.4. *Adhezijsko-deformacijska teorija trenja*

Adhezijsko-deformacijska teorija trenja je teorija kojom najbolje možemo opisati trenje u procesima oblikovanja metala deformiranjem. Trenje je u ovoj teoriji posljedica dvije pojave. Adhezijska komponenta trenja prisutna je zbog nastanka čvrstog spoja na mjestima stvarnog kontakta frikcijskog para. Sila trenja ove komponente je sila potrebna za savladavanje svih fizičkih i kemijskih zbivanja nastalih u toku dodira dviju površina u dodiru. Deformacijska komponenta trenja javlja se zbog deformiranja neravnina mekšeg člana frikcijskog para. Ova teorija najbolja je za objašnjavanje trošenja materijala u oblikovanju deformiranjem te nam omogućuje optimalan izbor maziva za smanjenje sile trenja i trošenja. Jedini nedostatak ove teorije je što ona objašnjava trenje kao posljedicu stacionarnog režim, a trenje je mehanizam koji se događa u nestacionarnim uvjetima. Dakle, ova teorija govori da će prilikom dodira alata i obratka doći do plastične deformacije na površinama stvarnog kontakta frikcijskog para. Prilikom napredovanja te plastične deformacije, doći će do međusobnog usklađenja i geometrijskog prilagođavanja tih površina. Rezultat toga je njihovo sljubljivanje i očvršćenje. Uslijed velikog tlaka na tim mjestima stvorit će se čvrsti metalni spoj. [2]

2.1.2. *Modeli trenja*

2.1.2.1. *Suho trenje*

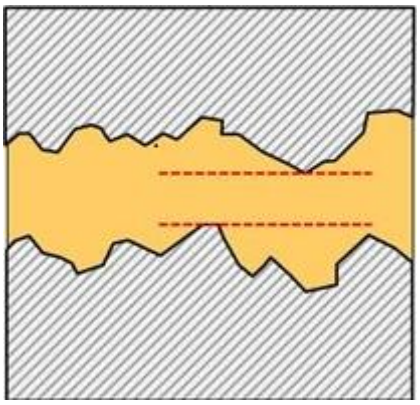
Suho trenje javlja se kada na cijeloj kontaktnoj površini frikcijskog para ne postoji nikakav sloj maziva ili neke druge tekućine ili tvari, tj. uvjet je postojanje metalno savršeno čiste površine i alata i obratka. U realnim uvjetima pojava suhog trenja gotovo je nemoguća jer uvijek postoji barem sloj oksida, no realna je lokalna pojava suhog trenja. Adhezijsko-deformacijska teorija trenja vrlo dobro nam pojašnjava suho trenje. Čvrstoća nastalih metalnih spojeva uslijed deformacije i adhezije veća je od čvrstoće metala obratka. Stoga, potrebna je relativno velika sila za kidanje tih veza, a nakon kidanja, preostali dio zalijepit će se na površinu alata. Lijepljenjem tog preostalog dijela na površinu alata značajno će se pogoršati kvaliteta alata, njegova hrapavost biti će veća te će tako dobivanje proizvoda željene kvalitete površine biti otežano. Povećanjem temperature tokom oblikovanja možemo u pojedinim slučajevima spriječiti lijepljenje tih čestica na alat i s tim usporiti trošenje alata i osigurati bolju kvalitetu površine obratka. [1]



Slika 5. Suho trenje [14]

2.1.2.2. Potpuno hidrodinamičko trenje

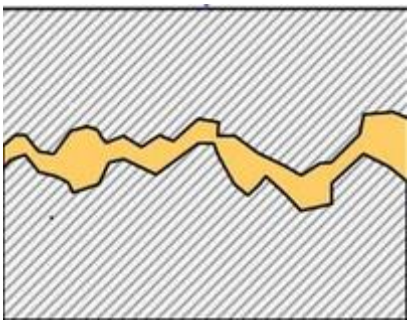
Potpuno hidrodinamičko trenje potpuno je suprotno suhom trenju. Kod ovog slučaja trenja, površine frikcijskog para potpuno su razdvojene slojem maziva određene debljine. U ovom slučaju kontaktnog trenja između površina nema pošto one i nisu u direktnom dodiru već se trenje zbiva samo unutar sloja maziva, između čestica maziva. Posljedica toga je i jako nizak faktor trenja koji se kreće u granicama od 10^{-2} do 10^{-3}. Hidrodinamičko trenje u postupcima oblikovanja deformiranjem nije ostvarivo uslijed prisutnih velikih sila tokom procesa koji onda istiskuju slojeve maziva. Ovakva vrsta trenja vidljiva je kod kliznih ležajeva gdje zbog visoke frekvencije vrtnje rotirajućih elemenata dolazi do stvaranja uljnog klina koji onemogućava dodir između ležaja i tog rotirajućeg elementa. [1]



Slika 6. Potpuno hidrodinamičko trenje [15]

2.1.2.3. Mješovito trenje

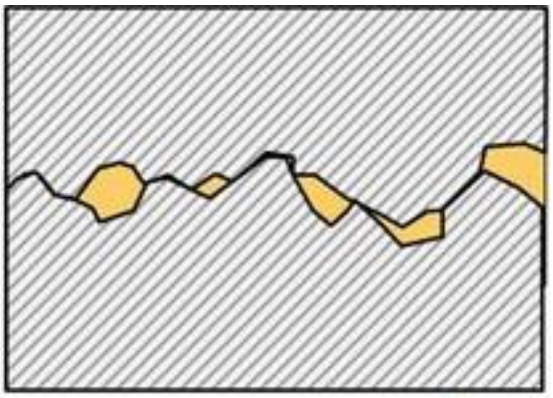
Mješovito trenje je model trenja u kojem se susrećemo s elementima i suhog i potpuno hidrodinamičkog trenja te je to najčešći oblik trenja prisutan u procesima oblikovanja deformiranjem uz korištenje obilnog podmazivanja. Faktor mješovitog trenja kreće se u granicama od 10^{-1} do 10^{-2} i ovisi o debljini ostvarenog sloja maziva. Ukoliko je jače izražena komponenta potpuno hidrodinamičkog trenja faktor trenja je naravno manji. To će se ostvariti ukoliko je debljina sloja maziva relativno jednako raspoređena po cijeloj površini dodira i ako iznosi oko 10^{-4} µm. Ukoliko sloj maziva nije jednoliko raspoređen po površini frikcijskog para i njegova se debljina kreće u granicama od 10^{-6} do 10^{-4} µm komponenta potpuno hidrodinamičkog trenja bit će nešto manja te će faktor trenja biti bliže redu veličine 10^{-1}. [1]



Slika 7. Mješovito trenje [15]

2.1.2.4. Granično trenje

Granično trenje je vrsta trenja koje se javlja kada se između kontaktnih površina frikcijskog para nalazi tanki nemetalni sloj. Taj sloj se stvara uslijed kemijske reakcije nekog elementa iz okoline s površinom metala alata i obratka. Direktan kontakt između površina alata i obratka ne postoji ukoliko taj nemetalni sloj nije razoren vršcima hrapavosti površina alata i obratka. Relativno gibanje ostvaruje se klizanjem vanjskih površina nemetalnog sloja. Faktor trenja u ovom slučaju kreće se oko 0,3. Za postizanje graničnog trenja potrebna je velika kemijska reaktivnost komponenti u mazivu. Ona se postiže pomoću kemijski vrlo aktivnih komponenti kojima su osnove masne kiseline, spojevi klora, fosfora, arsena i sumpora. Sumpor i fosfor stvaraju slojeve otporne na tlak, a arsen i fosfor stvaraju slojeve koji sprečavaju lijepljenje i trošenje alata. Cilj stvaranja uvjeta potrebnih za granično trenje je sprečavanje direktnog kontakta alata i obratka što značajno usporava trošenje alata te poboljšava kvalitetu površine obratka. [1]



Slika 8. Granično trenje [15]

2.2 Sila trenja

Sila trenja je sila koja se suprotstavlja gibanju tijela po podlozi. Njen smjer uvijek je suprotan od smjera kretanja tijela. Proporcionalna je normalnoj sili kojom jedno tijelo djeluje na drugo te ne ovisi o površini dodira. [9]

Silu trenja računamo kao umnožak faktora trenja i normalne sile:

$$F_t = F_N * \mu \tag{1}$$

Gdje su:

F_t- sila trenja, N

F_N- normalna sila, N

μ- faktor trenja

2.3. Faktor trenja

Faktor trenja μ je faktor koji nam uz poznatu normalnu silu na tijelo daje vrijednost sile trenja. Uglavnom nam je cilj da on bude što je moguće niži te nam je u pojedinim situacijama od velike važnosti da unaprijed znamo u kojim će nam se on granicama kretati tokom procesa kako bi mogli predvidjeti potrebnu pritisnu silu, utrošeni rad i energiju te potencijalno trošenje i radni vijek alata.

2.3.1. Rangiranje trenja po Kloss-u

Tablica rangiranja trenja po Kloss-u daje nam dobar uvid u kretanje faktora trenja ovisno o vrsti trenja koje nastupa prilikom određenih uvjeta. [2]

Tablica 1. Rangiranje trenja po Kloss-u

Vrijednost faktora trenja			>1	
	0,1	0,3		
	0,03			
		0,01 0,001		
	Hidrodinamičko trenje	Mješovito trenje	Granično trenje	Suho trenje

Iz tablice iznad vidljivo nam je da se faktor trenja kod potpuno hidrodinamičkog trenja kreće u granicama od 10^{-3} do 10^{-2}, kod mješovitog trenja od 0,03 do 0,1, graničnog trenja od 0,1 do 0,3 te kod suhog trenja od 0,3 pa do preko 1. Ti podatci nam govore da bi skoro uvijek morali težiti postizanju potpuno hidrodinamičkog trenja, no kako je navedeno prije u poglavljima, to nije uvijek tako jednostavno, pogotovo u procesima oblikovanja deformiranjem. S ciljem očuvanja alata barem bi se moralo izbjegavati suho trenje jer u toj situaciji sila koju moramo postići tokom oblikovanja je dosta velika što dovodi do većeg trošenja alata, prigona, vodilica te ostalih elemenata stroja.

2.3.2. Postupak određivanja faktora trenja

Postoje dva način određivanja faktora trenja, računalni i eksperimentalni. Računalnim načinom faktor trenja μ određujemo iz poznatog izraza za deformacijsku silu uz uvjet da su nam sve ostale veličine u izrazu poznate. Činjenica je da faktor trenja tokom čitavog procesa nije jednak te izračunom ustvari, aproksimirajući, dobivamo njegovu prosječnu vrijednost.

Ukoliko vrijednost faktora trenja otkrivamo eksperimentom, moramo biti svjesni da dobivena vrijednost vrijedi samo za uvjete u kojima se eksperiment odvijao te da ta vrijednost predstavlja prosječnu vrijednost faktora trenja tokom procesa. Većina postupaka oblikovanja metala deformiranjem temelji se na djelovanju tlačnog naprezanja na obradak pa je stoga osmišljena relativno jednostavna, brza i jeftina metoda određivanja faktora trenja sabijanjem prstena (Burgdorffova metoda). Izvodi se sabijanjem standardizirane epruvete prstenastog oblika. Unutarnji promjer prstena je izrazito osjetljiv na silu trenja te će se on povećati ukoliko je faktor trenja μ mali, a smanjiti ako je on veliki. Nakon eksperimenta mjere se unutarnji promjer prstena i njegova visina pomoću kojih iz kalibracijskog dijagrama očitavamo vrijednost djelujućeg faktora trenja. Nazivne dimenzije standardizirane epruvete iznose:

$$h_0 = 7 \text{ mm}$$

$$d_{u0} = 10 \text{ mm}$$

$$d_{v0} = 20 \text{ mm}$$

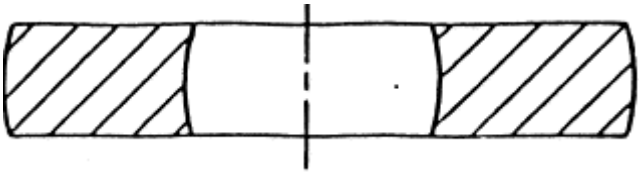
Gdje su:

h_0= početna visina prstena, mm

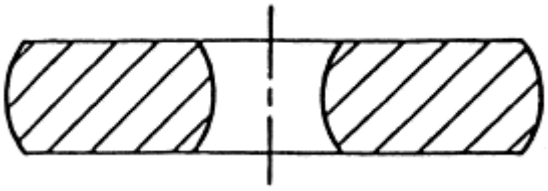
d_{u0}= početni unutarnji promjer prstena, mm

d_{v0}= početni vanjski promjer prstena, mm

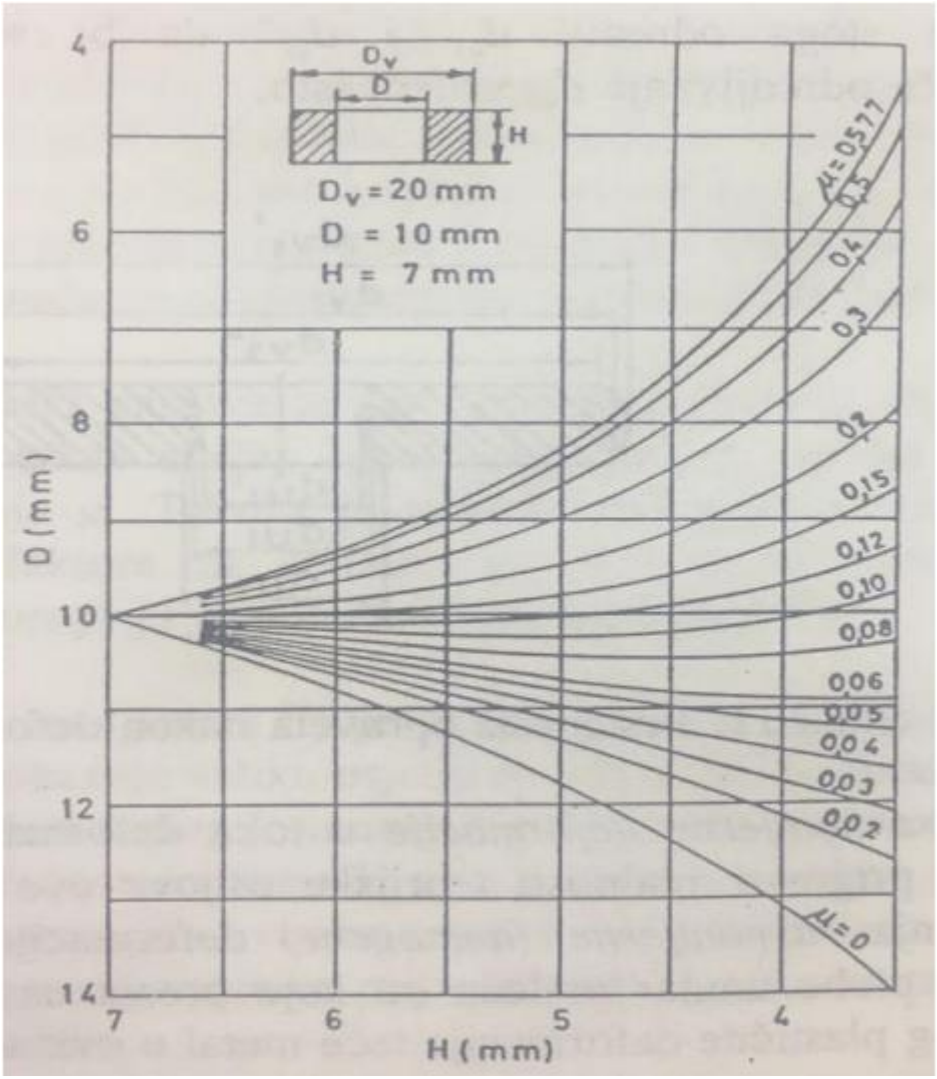
Postupak određivanja faktora trenja metodom sabijanja prstena je veoma fleksibilan postupak pošto imamo mogućnost provođenja eksperimenta s različitim mazivima, pod različitim temperaturama, različitim brzinama deformacije te možemo koristiti različite materijale prstena različitih hrapavosti kontaktne površine. [2]



Slika 9. Sabijeni prsten s dobrim podmazivanjem (nizak faktor trenja) [16]



Slika 10. Sabijeni prsten s lošim podmazivanjem (visok faktor trenja) [16]



Slika 11. Kalibracijski dijagram za određivanje faktora trenja [1]

2.4. Utjecajni čimbenici na trenje u postupcima oblikovanja metala deformiranjem

Kako je prethodno navedeno, postoji jako puno čimbenika koji utječu na trenje, na neke od njih uvijek imamo utjecaj, a na neke ne. Ukoliko pravilno odaberemo određene parametre značajno možemo utjecati na trenje i smanjiti ga što i najčešće je glavni cilj.

Utjecajni čimbenici na trenje:

Mazivo- pravilnim odabirom maziva imamo najveći utjecaj na trenje te deformacijsku silu. Odabirom maziva optimalne viskoznosti ili s određenim aditivima za određeni postupak oblikovanja deformiranjem značajno možemo smanjiti utrošak energije te usporiti trošenje alata. Ukoliko kod hladnog oblikovanja deformiranjem odaberemo pravilno mazivo, možemo se značajno približiti uvjetima potpuno hidrodinamičkog trenja. [1]

Hrapavost površine alata ima važnu funkciju u sprečavanju maziva od otjecanja sa površina alata i izratka te je uvjet za postizanje režima bliskog potpuno hidrodinamičkom trenju. Najmanje sile kontaktnog trenja javit će se ukoliko je reljef hrapavosti na površini alata barem približno pravilan i ujednačen. Ukoliko se površina alata obrađuje uobičajenim metodama površinske obrade kao što su tokarenje, glodanje i brušenje, hrapavost alata bit će orijentirana u smjeru obrade što će uzrokovati anizotropiju trenja, stoga se preporučuje da se površina obrađuje ručnom finom obradom kako bi koliko toliko ostvarili izotropnost trenja. [1]

Hrapavost površine izratka ima važnost samo u početku procesa oblikovanja deformiranjem jer se u toku deformacije tekstura površine izratka u potpunosti izjednači s teksturom površine alata. To se događa zbog puno veće površinske tvrdoće alata od tvrdoće površine izratka pa se tako sve neravnine na mikroskopskoj razini utiskuju u površinu izratka. I kod površine izratka je od velike važnosti da je hrapavost površine jednolika i pravilna kako bi se mazivo moglo jednoliko raspodijeliti po površini. [1]

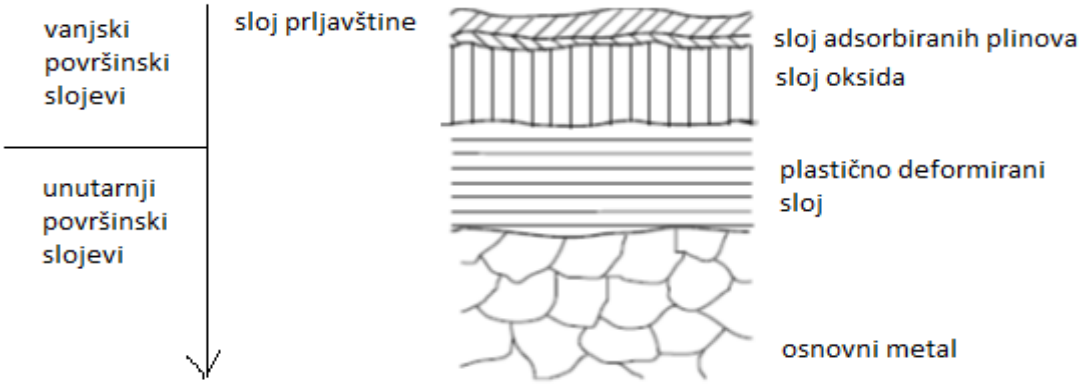
Brzina deformacije je parametar koji ima velik utjecaj na trenje. Povećanjem brzine deformacije, trenje se u pravilu smanjuje, no u praksi taj podatak nam i nema neki prevelik utjecaj pošto rijetki industrijski strojevi koji se koriste za oblikovanje deformiranjem imaju mogućnost promjene brzine. [1]

Temperatura deformiranog materijala ima veoma složen utjecaj na trenje. Utjecaj temperature na trenje javlja se u dva oblika. Povećanjem temperature značajno se mijenjaju fizikalno-kemijska svojstva maziva, a na kontaktnim površinama alata i obratka stvaraju se oksidi što uzrokuje porast sile trenja. U realnim postupcima mi to ne primjećujemo jer s povećanjem temperature oblikovanog metala, naprezanje plastičnog tečenja je smanjeno pa to nekako kompenzira porast sile trenja uzrokovan stvaranjem oksida i promjenama svojstva maziva. [1]

Stupanj deformacije ima veliki utjecaj na stabilnost mazivnog sloja na obratku. Povećanjem stupnja deformacije taj sloj bit će razoren i istisnut. Ta pojava uzrokuje dolazak novih slojeva metala na kontaktnu površinu koji nisu prekriveni slojem maziva pa će zbog toga sila trenja, a proporcionalno i deformacijska sila, značajno porasti. [1]

2.5. Trošenje alata u procesima oblikovanja metala deformiranjem uslijed djelovanja trenja

Trošenje se jednostavno može definirati kao promjena dimenzija, oblika, mase ili stanja površine alata uslijed djelovanja trenja kod dodira tog alata s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Trošenje alata u oblikovanju deformiranjem odvija se na kontaktnim površinama alata i obratka. Podmazivanjem želimo umanjiti utjecaj trenja u procesu te tako smanjiti trošenje našeg alata. U olakšavanju razumijevanja djelovanja maziva pomaže nam Schmaltzova shema (presjek metalne površine). [6]

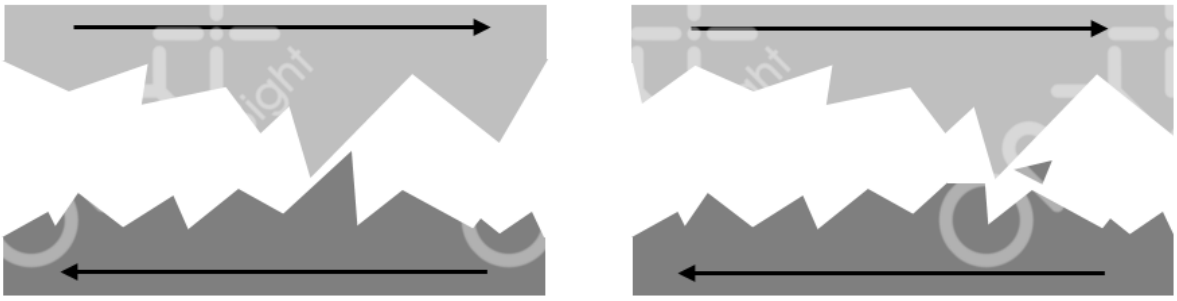


Slika 12. Schmaltzova shema [1]

Postoje četiri mehanizma trošenja alata korištenih u procesima oblikovanja metala deformiranjem. To su abrazija, adhezija, deformacija i umor površine. Vanjski površinski slojevi slojevito se troše i oni služe kao nosioci maziva. Unutrašnji površinski slojevi izloženi su adhezijskom i abrazijskom mehanizmu trošenja te nešto rjeđe trošenju zbog umora površine i deformacije uslijed djelovanja određene sile na površinu. [1]

2.5.1. Abrazija

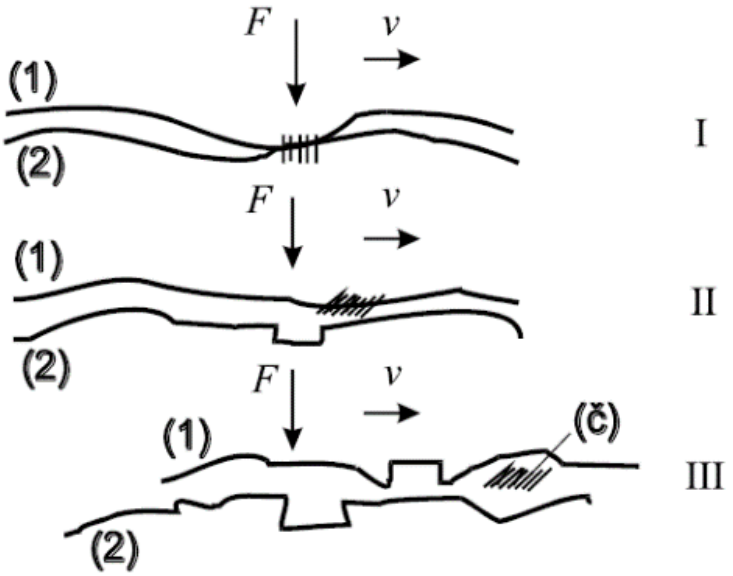
Abrazija je proces trošenja materijala istiskivanjem čestica materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama čija je tvrdoća veća od tvrdoće trošenog materijala. [6]



Slika 13. Proces abrazije [17]

2.5.2. Adhezija

Adhezija je proces trošenja materijala uzrokovan prijelazom čestica materijala s površine jednog sudionika frikcijskog para na površinu drugog. [6]

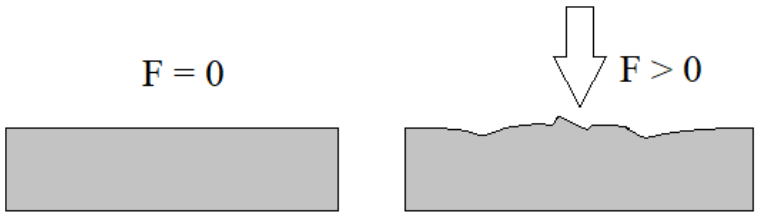


Slika 14. Proces adhezije [6]

Sudionika pod brojem 1 možemo smatrati alatom, a pod brojem 2 obratkom. U prvoj fazi dolazi do stvaranja adhezijskog spoja na mjestu dodira izbočina. Druga faza prikazuje raskidanje adhezijskog spoja gdje čestica trošenja spontano ostaje nalijepljena na kontaktnoj površini alata, a na površini obratka dolazi do stvaranja rupice. U posljednjoj trećoj fazi dolazi do odlamanja čestice trošenja što ostavlja trag trošenja i na površini alata.

2.5.3. Deformacija

Trošenje alata deformacijom u postupcima oblikovanja materijala deformiranjem predstavlja trošenje uzrokovano snažnim silama prisutnima u procesu koje uzrokuju elastičnu i plastičnu deformaciju površine alata. Elastična deformacija nema dugoročne posljedice za alat pošto se on vraća u prvobitno stanje nakon prestanka djelovanja opterećenja, no plastična deformacija ostavlja trajne posljedice na površini. Iako kod ovog oblika trošenja nema gubitka materijala, on je štetan za naš alat pošto se gubi željena tekstura i kvaliteta njegove površine, a usporedno s tim i kvaliteta površine obradaka. [6]



Slika 15. Deformacija površine uslijed djelovanja sile [6]

2.5.4. Umor površine

Umor površine je proces trošenja alata koji je nešto rjeđe prisutan u postupcima oblikovanja metala deformiranjem. Ovaj oblik trošenja uzrokuju ciklička promjena naprezanja te se on ne može spriječiti podmazivanjem. Problem kod ovog oblika trošenja je da se počinje događati ispod površine alata pa mi niti ne znamo da je trošenje nastupilo sve dok se dio alata ne odlomi. [6]

Slika 16. Umor površine [18]

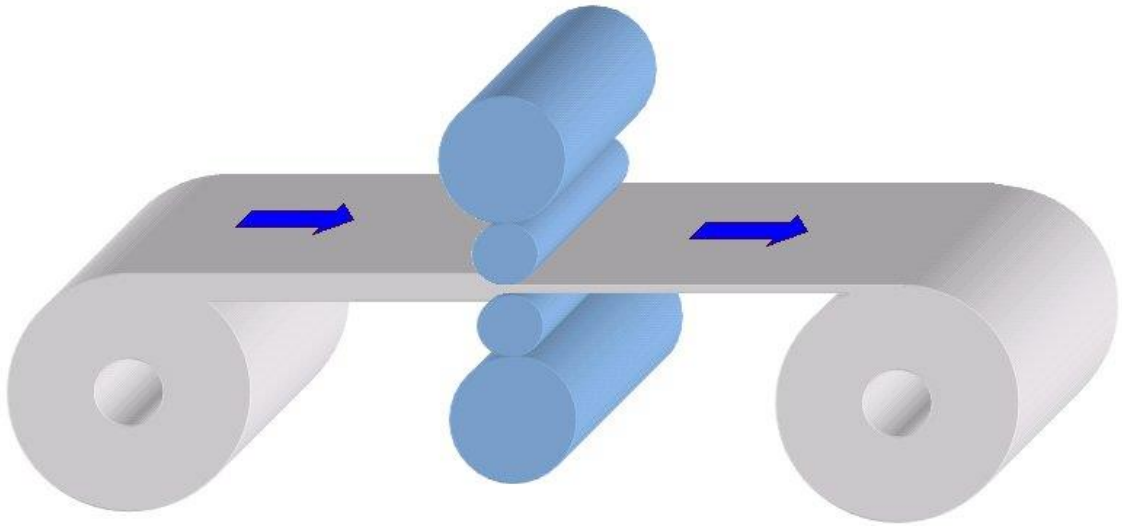
Na prethodnoj slici prikazan je način stvaranja i napredovanja pukotina ispod površine alata koje zatim uzrokuju odlamanje čestica materijala sa površine. Dakle prva faza je stvaranje mikropukotine koja zatim napreduje sve dok ne dođe do faze kada se dio materijala odlomi.

3. PODMAZIVANJE U POSTUPCIMA OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM

Kao što je već prije i navedeno, podmazivanjem najviše možemo utjecati na trenje tokom procesa. Svaki proces je po sebi specifičan i ne odgovara svako mazivo podjednako u određenom procesu, zato moramo imati puno znanja i iskustva kako bi odabrali ono optimalno i na taj način uštedjeli energiju, usporili trošenje alata te na kraju i smanjili troškove proizvodnje. Kod svakog procesa prvo je potrebno odrediti ulogu maziva u njemu te onda na temelju toga odabrati određeno mazivo.

3.1. Podmazivanje u procesima valjanja metala u toplom i hladnom stanju

Valjanje je najzastupljenija tehnologija od svih postupaka oblikovanja deformiranjem. Postupak se događa u više faza. Prvo se čelični ingoti oblikuju u poluproizvode koji zatim prolaze kroz sustave valjaka koji oblikuju gotove proizvode (cijevi, trake, tračnice…). Postupak se provodi tako što materijal prolazi kroz sustave valjaka čiji je razmak manji od debljine ulaznog materijala što uzrokuje njenu redukciju. Na kraju dobivamo proizvod koji je tanji, širi i duži od početnog. Valjanje se također može provoditi u toplom i hladnom stanju. Tanki limovi i trake najčešće se valjaju u hladnom stanju zbog mogućnosti postizanja bolje kvalitete površine te ekonomičnosti. U toplom stanju valjaju se materijali većih dimenzija jer se zagrijavanjem povećava plastičnost i moguće su veće redukcije presjeka. [2]



Slika 17. Postupak valjanja [19]

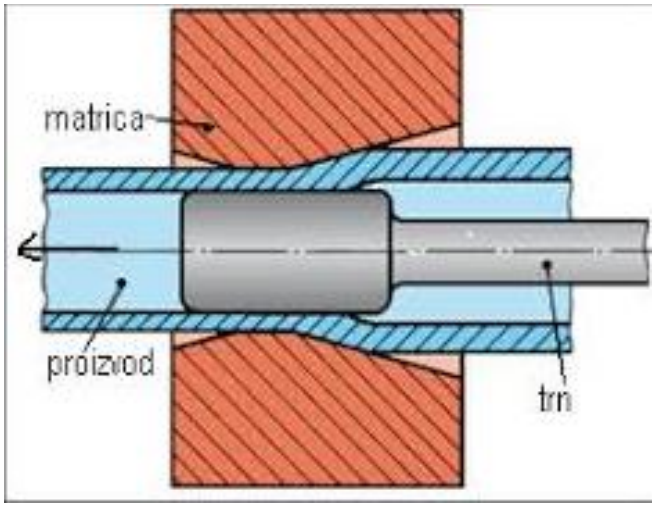
Trenje u ovom procesu nam je nužno jer ono osigurava da materijal bude zahvaćen i uvučen u valjke pa nam cilj podmazivanja u ovom slučaju nije smanjenje trenja. Zadaća maziva u procesima valjanja u toplom stanju je osiguravanje jednakomjernog i snažnog hlađenja valjaka. Kao maziva su najčešće prisutni voda ili emulzija jer će oni najbolje odvoditi toplinu, ponekad se koristi i prašak (magnezij u prahu) kako bi povećali trenja. [1]

Za valjanje različitih materijala u toplom stanju, koriste se i različita maziva. Tako se kod valjanja niskougljičnog čelika koristi voda i grafitizirana maziva, ili se ono obavlja na suho. Kod valjanja srednjougljičnih i niskolegiranih čelika, nehrđajućih čelika ili slitina na bazi nikla koriste se drvena piljevina, grafitizirana voda ili također bez ikakvog podmazivanja. Za valjanje aluminijskih i magnezijevih slitina koristi se emulzija, a valjanje bakra i njegovih legura obavlja se na suho ili s vodom. [1]

Kod valjanja niskougljičnih, srednjougljičnih i niskolegiranih čelika u hladnom stanju koriste se emulzije ili uljne disperzije. Za valjanje nehrđajućih čelika, aluminijskih i magnezijevih slitina te bakra i njegovih slitina koriste se najčešće mineralna ulja ili njihove disperzije u vodi. Petrolej se koristi za hladno valjanje folija. [1]

3.2. Podmazivanje kod provlačenja žica, cijevi i profila

Provlačenje je postupak oblikovanja deformiranjem kojim se proizvode različiti materijali u obliku šipka raznih poprečnih presjeka. Provlačenje je također postupak koji često slijedi nakon postupaka valjanja ili ekstruzije s ciljem postizanja tražene kvalitete površine, dimenzijske točnosti te povećanja čvrstoće i tvrdoće materijala, no najčešći razlog korištenja postupka provlačenja u proizvodnji je redukcija poprečnog presjeka. Provlačenje se može provoditi i u toplom i u hladnom stanju, no najčešće se provodi u hladnom stanje. Provlačenje u toplom stanju provodi se dosta rijetko, npr. kod proizvodnje čeličnih boca za plinove pod pritiskom ili kod proizvodnje topovskih čahura. [2]



Slika 18. Provlačenje cijevi [20]

Kod postupaka provlačenja matrica je dio alata na koji djeluju najveće sile i koji je vrlo sklon trošenju pa nam je tako najvažniji cilj podmazivanja smanjenje trošenja matrice i produljenje njenog roka trajanja. Provlačenje se provodi pod relativno visokim brzinama što za posljedicu ima smanjenje faktora trenja što nam odgovara, no veća brzina znači i veće zagrijavanje alata što znači da moramo i efikasno hladiti taj alat. [1]

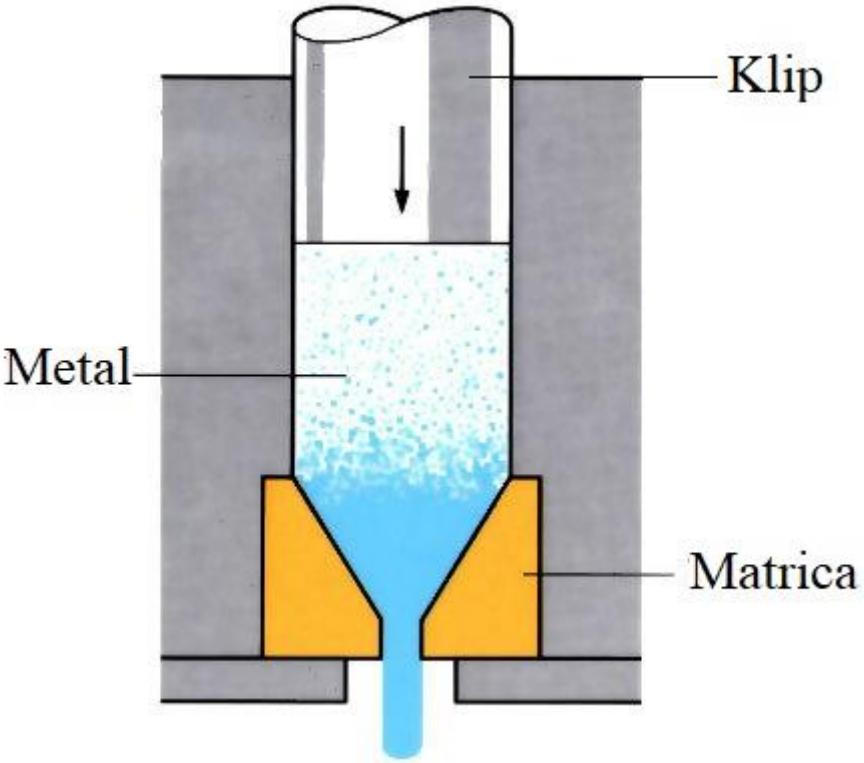
Kod provlačenja žice maziva koja najčešće koristimo su suha maziva (prah kalcijevog stearata) te ulje jer se pomoću njih najviše može smanjiti trošenje matrice. Cilj nam je postići mješovito trenje s većim udjelom čistog hidrodinamičkog trenja. Uz pravilan odabir maziva, uvjete za postizanje takvog trenja možemo postići i pravilnom konstrukcijom alata kako bi dovod maziva u sustav bio konstantan bez prekida. Ukoliko zbog određenih razloga ne možemo postići željeni udio čistog hidrodinamičkog trenja, onda u mazivo dodajemo nosioce maziva kao što su vapno, fosfati i oksalati kako bi faktor trenja u mješovitom trenju što više snizili. Aditive u mazivo dodajemo kako bi postigli sjajnu površinu gotovog proizvoda. Kod odabira aditiva moramo biti jako oprezni pošto određeni aditiv može kemijski reagirati s oblikovanim materijalom te bi tako umjesto sjajne površine mogli dobiti površinu s mrljama ili nekim drugim tragovima. [1]

Kod provlačenja cijevi uz trošenje matrice, zbog velikih sila još se izraženije troši trn. Provlačenje čeličnih cijevi s većim stupnjem deformacije provodi se podmazivanjem s natrijevim stearatom uz prethodno fosfatiranje cijevi, a kod manjih stupnjeva deformacije koriste se neka složenija maziva koja se lako nanose i odstranjuju nakon procesa. Za provlačenje aluminijskih cijevi koriste se klorirana masna ulja i zamašćena minerala ulja. [1]

Kod provlačenja čeličnih profila za podmazivanje se koriste sapun ili talk. Talk je mineral sa slojevitom kristalnom strukturom. Za podmazivanje kod provlačenja aluminijskih, magnezijskih i bakrenih profila koristi se mast te masna i minerala ulja. [1]

3.3. Podmazivanje kod oblikovanja metala istiskivanjem

Istiskivanje ili ekstruzija je postupak oblikovanja metala deformiranjem kojim se proizvode šipke i cijevi različitih poprečnih presjeka. Materijali koji su najpogodniji za istiskivanje su obojeni i laki metali i slitine. Čelik je materijal koji nije najpogodniji za ovakav oblik oblikovanja pošto su za njegovo istiskivanje potrebne velike sile koje onda opterećuju matricu koja nerijetko to ne može izdržati te se prebrzo istroši. Istiskivanje je najčešće postupak koji prethodi postupku provlačenja pošto se istiskivanjem ne mogu dobiti željena svojstva materijala. Također istiskivanje se može provoditi u hladnom, polutoplom i toplom stanju. [2]



Slika 19. Proces istiskivanja [21]

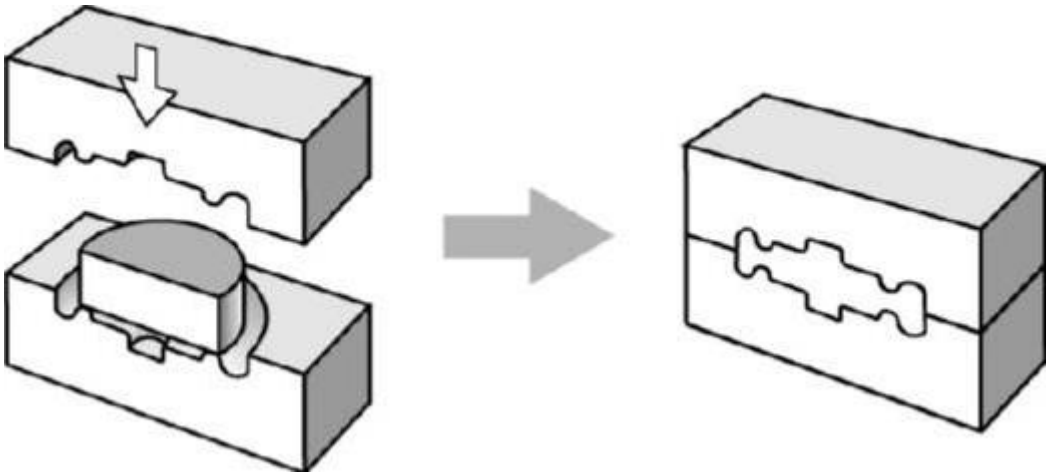
Prilikom hladnog istiskivanja metala kroz alat, javljaju se velika tlačna naprezanja koja ga opterećuju. Stoga je najvažnija zadaća podmazivanja smanjiti trenje te maksimalno reducirati trošenje alata. U suvremenoj proizvodnji postupak istiskivanja je najčešće automatiziran što stvara poteškoće pri planiranju podmazivanja pošto nanošenje maziva na sirovac mora biti podjednako i konstantno. Kako bi se osiguralo pravilno prianjanje maziva na sirovac, sirovac se prije početka procesa fosfatira te onda taj fosfatni sloj ima ulogu nosioca maziva. Kao mazivo kod istiskivanja čelika koriste se natrijevi sapuni, suspenzija MoS_2, natrijevi, aluminijevi i kalijevi stearati, masti te mineralna ulja. Kod hladnog istiskivanja aluminija i bakra te njegovih slitina, kao mazivo koriste se lanolin, cinkov stearat te kod aluminija masna ulja, a kod bakra i njegovih slitina klorirana ulja. [1]

Kod istiskivanja u toplom stanju, sile na alat su nešto manje pošto je oblikovljivost materijala proporcionalno veća s temperaturom. No, zadaci podmazivanja u ovom slučaju su osiguravanje pravilnog tečenja metala tokom procesa, toplinska izolacija stijenke alata od visoke temperature sirovca te maksimalno moguće reduciranje trošenja alata. Kao mazivo kod oblikovanja čelika najčešće se koristi grafit, a kod nehrđajućeg čelika staklo koje se tali na temperaturi na koju zagrijavamo sirovac. Istiskivanje materijala kao što su aluminij te aluminijeve i magnezijeve u toplom stanju je praktički jedini postupak kojim možemo dobiti raznolike profile ovih materijala, no tu je velika prednost da temperature istiskivanja tih materijala i nisu previsoke naspram čelika (450 °C naspram 1200 °C) te je njihova oblikovljivost puno veća pa korištenje maziva i nije potrebno. [1]

3.4. Podmazivanje kod oblikovanja metala kovanjem u ukovnju

Kovanje je najstariji postupak oblikovanja metala deformiranjem, to je postupak koji se koristi od kako se koristi i metal kao materijal. U prošlosti se najčešće koristilo za proizvodnju oruđa i oružja, dok je danas upotreba kovanja daleko šira. Provodi se najčešće u toplom stanju pošto je onda oblikovljivost metala puno veća te su potrebne deformacijske sile manje. Unatoč tome što na taj način i štedimo energiju, u drugom pogledu puno energije se potroši na zagrijavanje sirovca. Vrste kovanja su slobodno kovanje i kovanje u ukovnju. Kod slobodnog kovanja tečenje metala je slobodno te se ono koristi kod pojedinačne proizvodnje, jer je gotovo nemoguće proizvesti više jednakih izradaka slobodnim kovanjem te kod proizvodnje nekih pozicija velikih dimenzija koje nije moguće proizvesti na neki drugi način. Kod kovanja u ukovnju tečenje materijala je ograničeno ukovnjem ili kalupom pa tako oblikovani metal poprima oblik ukovnja. Kovanje u ukovnju je široko rasprostranjeni postupak u današnjoj industriji jer je proizvodnost velika, lako se postiže tražena kvaliteta te je visoka dimenzijska točnost i lako je dobiti veći broj podjednakih izradaka. [2]

Slika 20. Primjer slobodnog kovanja [22]



Slika 21. Kovanje u ukovnju [23]

Ukovanj je tijekom oblikovanja podvrgnut veliki dinamičkim i toplinskim naprezanjima pa je zbog toga nužno korištenje podmazivanja kako bi usporili njegovo trošenje i smanjili kontaktno trenje s ciljem maksimalnog mogućeg produženja njegovog vijeka trajanja. Širok je spektar maziva koji se koriste kod kovanja u ukovnjima, a na odabir optimalnog maziva naravno najveći utjecaj ima oblikovani materijal te mogućnost da s odabranim mazivom maksimalno smanjimo trošenje ukovnja te reduciramo kontaktno trenje. Za kovanje niskougljičnih čelika najčešće se koriste grafitna ulja te masti ili piljevina. Za niskolegirane čelike koriste se grafit u ulju ili masti te rastaljeno staklo koje možemo taliti prilikom taljenja oblikovanog metala zbog uštede energije. Za kovanje nehrđajućih čelika koriste se tinjac[1] u prahu te grafitna ili masna ulja. Bakar i njegove legure podmazuju se grafitom u vodi ili ulju, a aluminijske i magnezijske slitine mineralnim ili masnim uljima te grafitom. [1]

3.5. Podmazivanje kod oblikovanja metala rotacijskim optiskivanjem

Rotacijsko optiskivanje je postupak oblikovanja metala deformiranjem koji se koristi u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji. Služi za proizvodnju različitih limenih proizvoda (posude, poklopci, vrčevi). Koristi se kod obradaka velikih dimenzija, posebnog oblika ili kada imamo širok spektar proizvoda od kojih se svaki povremeno proizvodi po par komada. Postupak se najčešće provodi u hladnom stanju na način da je proizvod pritegnut na rotirajuću steznu napravu te kada obradak rotira, primakne mu se alat tiskalo koji pritiskuje lim na šablonu. Tim pritiskanjem obratka na šablonu dolazi do plastične deformacije lima koji poprima oblik šablone. Podmazivanje ima značajnu ulogu u ovom procesu iz razloga što je potrebno brzo i učinkovito hlađenje metala. Kao mazivo najčešće se koristi petrolej koji uz učinkovito hlađenje obradaka, osigurava i visoku kvalitetu obrađene površine nakon oblikovanja. Emulzije unatoč tome što izrazito efikasno hlade metal, rijetko se koriste jer je kvaliteta površine nakon oblikovanja jako loša. [1]

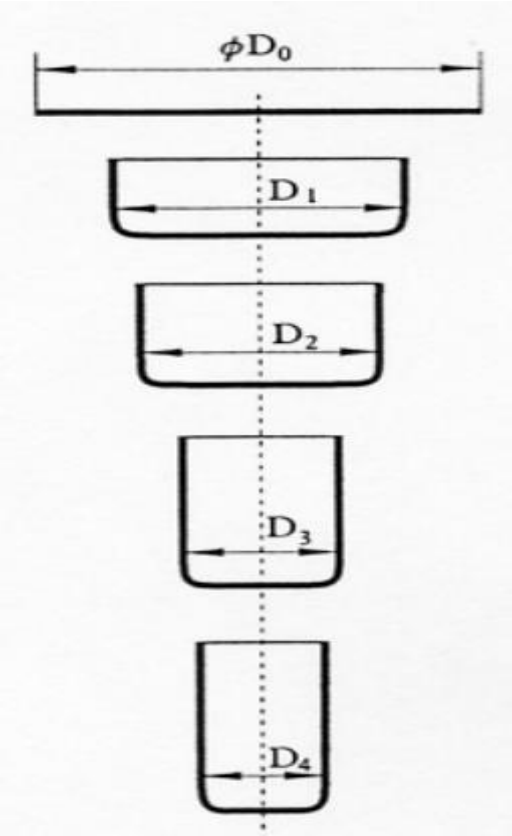
3.6. Podmazivanje u procesima oblikovanja metala postupkom dubokog vučenja

Duboko vučenje jedan je od najzastupljenijih postupaka oblikovanja deformiranjem u današnjoj industriji. Služi za proizvodnju i preradu lima i limenih proizvoda širokih raspona debljine (od 0,02 mm do 50 mm). Ovim postupkom izrađuje se široki spektar proizvoda, od posuda, dijelova radijatora, automobilske karoserije do sudopera i dijelova kućanskih aparata te se on najčešće provodi u hladnom stanju, tek kod rijetkih izuzetaka u toplom stanju. Kod tankih limova (oko 1 mm) oblikovanje se mora provoditi u hladnom stanju jer bi njihovo zagrijavanje moglo dovesti do degradacije kvalitete površine, a i sile oblikovanja kod takvih limova nisu velike pa nema ni potrebe za zagrijavanjem s ciljem smanjenja potrebne sile. Kod limova čija debljina iznosi 10 mm ili više potrebno je provesti barem blago zagrijavanje budući da potrebna sila za oblikovanje raste s dimenzijama, kod takvih debljina iznosi sile su relativno veliki pa ih je poželjno smanjivati zagrijavanjem. Duboko vučenje je postupak koji se najčešće izvodi u više faza s više alata. Debljina lima morala bi nakon postupka ostati jednaka onoj na početku, no u praksi to je teško izvedivo te ona malo odstupa od nazivne vrijednosti na pojedinim mjestima (npr. blizina dna posude). Postupak dubokog vučenja provodi se na način

[1] Tinjac je vrsta slojevitog silikata koji izgrađuje brojne stijene, a sastoji se od željeza, kalija, magnezija, litija i brojnih drugih kemijskih elemenata.

da žig preše (hidrauličke ili ekscentar) tlači rondelu čije tečenje se odvija u smjeru tlačenja žiga i ona poprima oblik tog žiga i matrice. Postoji opasnost od pojave nabora na rubu rondele, no kako bi to spriječili koristimo tlačni prsten čiji pritisak ne smije biti premali jer bi u tom slučaju došlo do stvaranja nabora koje želimo spriječiti, a opet ne smije biti niti preveliki jer bi to prouzrokovalo pucanje lima i stvaranje škarta. Materijali pogodni za oblikovanje dubokim vučenjem su čelici dovoljno visoke istezljivosti te mjed koja bi morala imati postotak cinka od oko 32% kako bi ta tražena istezljivost bila zagarantirana. [2]

Najvažniji pojam u procesu dubokog vučenja je stupanj redukcije. Pomoću njega određujemo potreban broj faza dubokog vučenja. Taj broj omjer je promjera posude nakon postupka i promjera posude prije postupka. [24]



Slika 22. Prikaz pojedinih faza dubokog vučenja [24]

$$m_1 = \frac{D_1}{D_0} \sim 0{,}6$$

$$m_2 = \frac{D_2}{D_1} \sim 0{,}8$$

$$m_3 = \frac{D_3}{D_2} \sim 0{,}82$$

$$m_4 = \frac{D_4}{D_3} \sim 0{,}84 \qquad (2)$$

Gdje su:

m- koeficijent redukcije

D- promjer posude, mm

Iz prethodno napisanih formula vidljivo je da stupanj redukcije iz faze u fazu lagano raste što znači da je deformacija sve manja što je i logično pošto je poznato da je istezljivost materijala nakon svakog pojedinog ciklusa sve manja.

Najčešća greška u postupku dubokog vučenja je pucanje dna posude izazvano zbog preniskog koeficijenta redukcije ili prevelike sile tlačnog prstena. Ostale greške su nejednolika visina posude što je posljedica anizotropije oblikovanog lima te raspucavanje ruba posude zbog nepravilnog podmazivanja, nejednolike debljine lima, ekscentriciteta žiga i matrice… [2]

Trenje u postupku dubokog vučenja ima veliku ulogu. Veliku pozornost treba pridati da iznosi trenja ne postignu neke prevelike vrijednosti jer to vodi do prije nabrojenih grešaka. Najveći utjecaj trenje ima prilikom prelaska materijala preko radijusa zaobljenja ruba matrice. Ukoliko je to trenje preveliko, ukupno naprezanje u limu može se povećati i za 60% što je nedopustivo te se to sprečava uporabom optimalnog maziva, kemijskom obradom lima te korištenjem sivog lijeva kao materijala za alat koji djeluje podmazujuće. Mazivo ima i velik utjecaj na koeficijent redukcije koji je moguće postići u određenoj fazi dubokog vučenja. U industrijskim uvjetima može se koristiti velik broj maziva. Čelici se podmazuju MoS_2 pastom, klorparafinom, uranjanjem u sapun ili nanošenjem sloja polimera na lim. Aluminijske i magnezijeve slitine podmazuju se masnim uljima, uranjanjem u sapun ili parafinom. [1]

3.6.1. Utjecaj trenja na silu dubokog vučenja

Za definiranje sile dubokog vučenja formulom moramo prvo odrediti sva naprezanja koja se javljaju u materijalu tokom oblikovanja. Prvo naprezanje javlja se zbog plastične deformacije materijala i ono je radijalno te čini 70% ukupnog naprezanja u materijalu. [1]

$$\sigma_r = k_f \times ln\frac{D_0}{D_m} \tag{3}$$

Gdje su:

σ_r- radijalno naprezanje, N/mm^2

k_f- naprezanje plastičnog tečenja, N/mm^2

D_0- promjer rondele, mm

D_m- promjer matrice, mm

Naredno naprezanje javlja se zbog sile trenja tlačnog prstena. Ono se javlja jer tlačni prsten svojom silom sprečava odvajanje rondele od matrice kako bi se spriječilo nabiranje ruba lima. [1]

$$\sigma_{tr} = \frac{2\mu \times F_{pr}}{D_m \times \pi \times s} \tag{4}$$

Gdje su:

σ_{tr}- naprezanje uslijed trenja tlačnog prstena, N/mm^2

μ- faktor trenja

D_m- promjer matrice, mm

s- debljina lima, mm

F_{pr}- sila tlačnog prstena, N

Iznos sile tlačnog prstena računamo po izrazu:

$$F_{pr} = p \times \frac{(D_0^2 - D_m^2) \times \pi}{4} \tag{5}$$

Gdje su:

p- pritisak tlačnog prstena, N/mm^2

D_0- promjer rondele, mm

D_m- promjer matrice, mm

Posljednje naprezanje koje moramo uzeti u obzir je naprezanje uslijed savijanja.

$$\sigma_{sav} = k_f \times \frac{s}{2 * r_m + s} \tag{6}$$

Gdje su:

σ_{sav}- naprezanje uslijed savijanja, N/mm^2

k_f- naprezanje plastičnog tečenja, N/mm^2

s- debljina lima, mm

r_m- radijus matrice, mm

Zbog prelaska materijala preko radijusa zaobljenja ruba matrice u obzir moramo uzeti i faktor $e^{\mu\alpha}$ gdje je μ faktor trenja, a α kut matrice koji većinom iznosi 90°. [1]

Konačan izraz za računanje ukupnog naprezanja u materijalu tokom postupka dubokog vučenja iznosi:

$$\sigma_{uk} = (k_f \times \ln\frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu \times F_{pr}}{D_m \times \pi \times s}) \times e^{\mu\alpha} + k_f \times \frac{s}{2 \times r_m + s} \quad (7)$$

Nakon dobivanja ovog izraza za naprezanje, možemo formulirati krajnji izraz za silu dubokog vučenja koji iznosi:

$$F_{dv} = D_1 \times \pi \times s \times \sigma_{uk} \quad (8)$$

Gdje su:

F_{dv}- sila dubokog vučenja, N

D_1- promjer posude nakon postupka, mm

s- debljina lima, mm

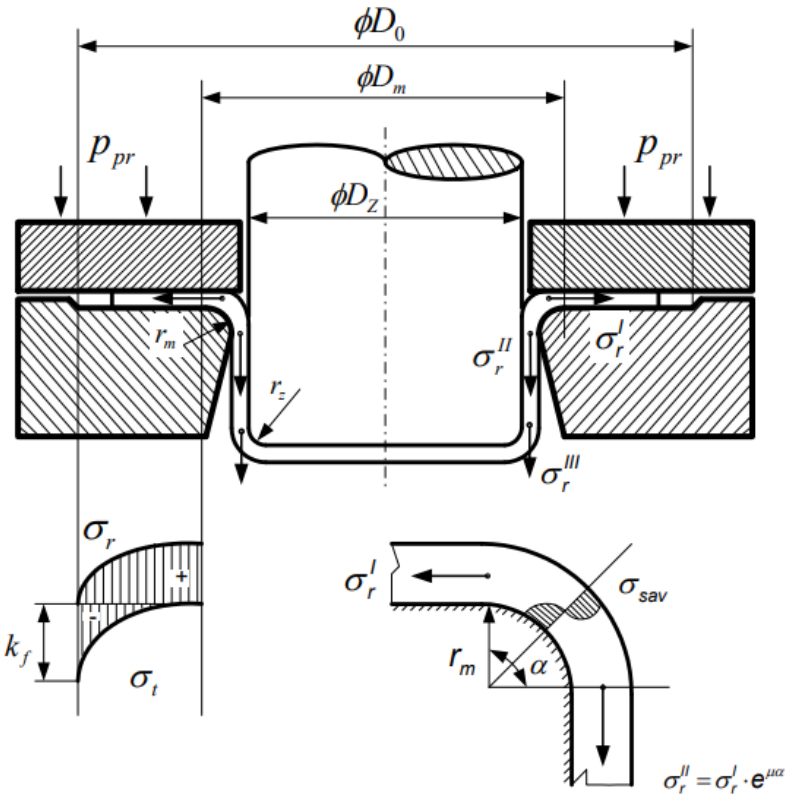
σ_{uk}- ukupno naprezanje u materijalu, N/mm^2

Narednim tabličnim prikazom možemo vidjeti kako se porastom faktora trenja mijenja i faktor $e^{\mu\alpha}$ kojim množimo naprezanja uslijed trenja tlačnog prstena te naprezanje uslijed plastične deformacije materijala. [1]

Tablica 2. Utjecaj faktora kontaktnog trenja

μ	$\mu\alpha$	$e^{\mu\alpha}$
0,1	0,16	1,17
0,15	0,24	1,27
0,2	0,31	1,37
0,25	0,39	1,48
0,3	0,47	1,6

Iz ove tablice vidljivo je da, kako je prethodno rečeno, ukoliko imamo nepovoljne uvjete trenja, ukupno naprezanje u limu može nam se povećati za 60%. To je nedopustivo jer shodno tome zahtjeva i puno veću silu dubokog vučenja što znači automatski i veće opterećenje i brže trošenje alata. Zbog toga moramo veliku pozornost obratiti biranju odgovarajućeg maziva kako bi izbjegli ovako visok faktor trenja tokom postupka.



Slika 23. Shema napregnutog stanja u procesu dubokog vučenja [2]

Na prethodnoj slici prikazana je shema napregnutog stanja kod procesa dubokog vučenja u kojoj su prikazana sva djelujuća naprezanja. Izrazi za izračunavanje svih tih naprezanja navedeni su i objašnjeni ranije. Od svih naprezanja prikazanih na slici trenje djeluje na naprezanje σ_r` koje je ustvari zbroj naprezanja uslijed plastične deformacije materijala σ_r na koje trenje nema utjecaj te naprezanja zbog djelovanja sile tlačnog prstena koje je izravna posljedica trenja. Naprezanje σ_r``` umnožak je naprezanja σ_r` i člana $e^{\mu\alpha}$ koji se javlja uslijed prelaska materijala preko radijusa zaobljenja te je utjecaj faktora trenja u tom članu izrazito

velik. Naprezanje σ_r```` je ukupno naprezanje u materijalu te je ono zbroj naprezanja σ_r`` i naprezanja uslijed savijanja σ_{sav} na koje trenje nema nikakav utjecaj. [24]

4. MAZIVA U POSTUPCIMA OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM

Maziva su kemijske tvari određenih kemijskih i fizikalnih svojstava koje se koriste za podmazivanje. Maziva djeluju na način da smanjuju trenje između površina koje su u kontaktu i koje se relativno gibaju. Koriste se za smanjenje trošenja strojnih dijelova, odvođenje topline, zaštitu od korozije te za odvođenje čestica nastalih oksidacijom ili nekom drugom kemijskom reakcijom. Zadaća maziva u postupcima oblikovanja deformiranjem je ostvarivanje kvalitetnog vanjskog graničnog sloja te smanjenje potrebne sile deformiranja što rezultira manjim trošenjem alata. [1]

4.1. Viskoznost

Najvažnija karakteristika maziva je viskoznost. Viskoznost je unutarnji otpor tekućine prema tečenju. Taj otpor uzrokuju kohezijske sile u fluidu i adhezijske sile između fluida i krutog tijela kroz koje se gibanje odvija. [25]

4.1.1. Dinamička i kinematička viskoznost

Oznaka dinamičke viskoznosti je grčko slovo mi (μ), a mjerna jedinica po SI sustavu je paskal-sekunda (Pas). Dinamička viskoznost najbolje i najjednostavnije može se vizualizirati kretanjem jedne od ploča između kojih se nalazi sloj fluida. Dakle, ukoliko se između ploča nalazi fluid dinamičke viskoznosti od 1 Pa te ako na jednu ploču djelujemo tangencijalno iznosom od 1 Pa, ta ploča preći će udaljenost jednaku debljini sloja maziva za 1 sekundu. [25]

Kinematička viskoznost je omjer dinamičke viskoznosti i gustoće. Označava se s grčkim slovom ni (ν), a mjerna jedinica je m^2/s.

Formula za izračunavanje kinematičke viskoznosti:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{9}$$

Gdje su:

ν- kinematička viskoznost, m^2/s.

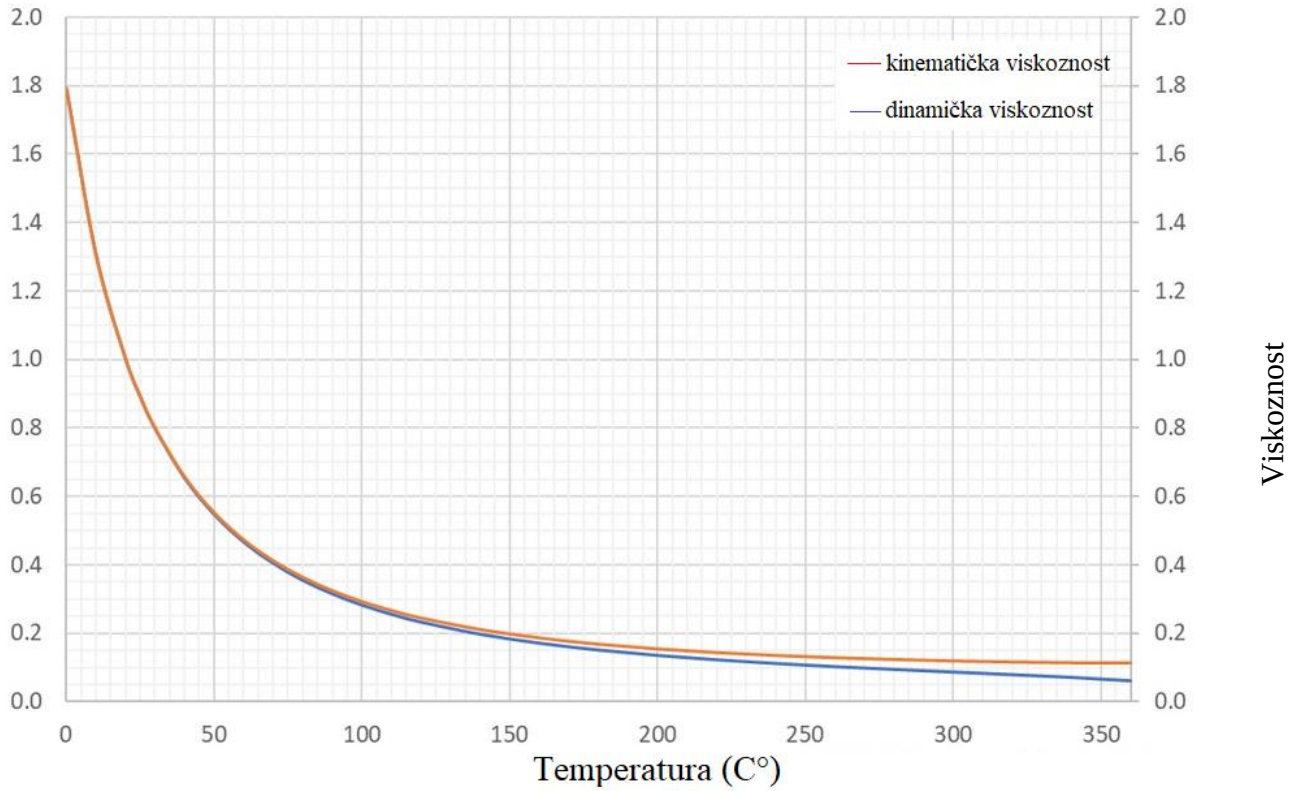
μ- dinamička viskoznost, Pas

ρ- gustoća fluida, kg/m^3

4.1.2. Ovisnost viskoznosti o temperaturi

Viskoznost ulja opada s porastom temperature. Ta činjenica je važna u postupcima oblikovanja deformiranjem jer moramo biti svjesni da ukoliko oblikujemo metal u toplom stanju, da će to prouzrokovati pad viskoznosti ulja što znači teže formiranje uljnog sloja (ulje

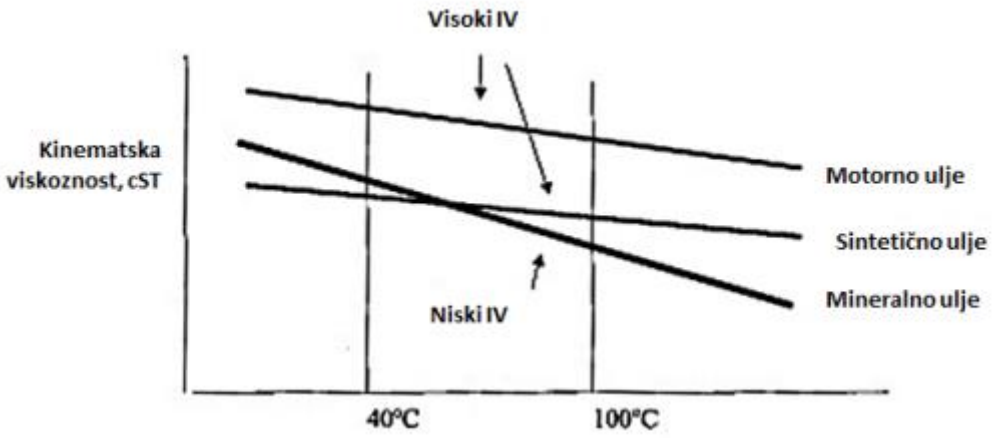
se lakše i brže „razlijeva“) te potencijalnu potrebnu veću silu oblikovanja. Dodavanjem različitih aditiva moguće je postići da su promjene viskoznosti ulja u ovisnosti o temperaturi veoma male. [25]



Slika 24. Ovisnost viskoznosti o temperaturi [25]

Iz prethodnog grafa vidljivo je da i kinematička i dinamička viskoznost eksponencijalno padaju s porastom temperature.

Indeks viskoznosti (IV) je parametar koji nam prikazuje ovisnost viskoznosti o temperaturi. Maziva čiji je indeks viskoznosti viši manje su osjetljiva na promjenu temperature i obratno. [26]



Slika 25. Kretanje indeksa viskoznosti različitih vrsta maziva [26]

Iz prethodnog grafa vidimo ono što je ranije napomenuto, dakle kod maziva s visokim indeksom viskoznosti promjena kinematičke viskoznosti u ovisnosti s temperaturom puno je manja nego kod maziva s niskim indeksom viskoznosti.

4.2. Sistematizacija maziva

Sistematizacija maziva korištenih u oblikovanju deformiranjem:

-maziva koja se miješaju s vodom

-maziva koja se ne miješaju s vodom

-kruta maziva

-filmovi (folije) i lakovi

-soli i stakla [1]

4.2.1. Maziva koja se miješaju s vodom

U maziva koja se miješaju s vodom ulaze tekuća maziva, konzistentna maziva, sapuni i maziva na bazi voska.

4.2.1.1. Tekuća maziva

Tekuća maziva su maziva sastavljena od baznog ulja i aditiva. Bazna ulja mogu biti mineralna i sintetska, no kod maziva korištenih u postupcima oblikovanja deformiranjem javljaju se isključivo mineralna bazna ulja uz eventualno sintetičke komponente. Od aditiva u to mineralno bazno ulje dodaju se emulgatori, baktericidi te korozijski inhibitori. Ova vrsta maziva može se isporučivati u različitim stupnjevima viskoznosti. [1]

4.2.1.2. Konzistentna maziva

Ova vrsta maziva su stabilizirane smjese mineralnih ulja, emulgatora, voska, sapuna i vode. Koristimo ih kao emulzije i to na dva načina, jedan je „ulje u vodi“, a drugi „voda u ulju“. Razlika između ovih emulzija je ta da se kod emulzije „ulje u vodi“ ulje ulijeva u vodu te su čestice ulja disperzirane u vodi, dok je kod slučaja „voda u ulju“ situacija obrnuta. [1]

4.2.1.3. Sapuni i maziva na bazi voska

Sapuni i maziva na bazi voska su ustvari voskovi koji dolaze u obliku granulata te sadrže emulgatore i sapune topive u vodi. [1]

4.2.2. Maziva koja se ne miješaju s vodom

U maziva koja se ne miješaju s vodom spadaju sva ona maziva nabrojana ranije, dakle tekuća maziva, konzistentna maziva te sapuni i maziva na bazi voska. Razlikuju se u tome da se ova maziva ne miješaju s vodom te se kao bazna ulja kod tekućih maziva koriste uz mineralna ulja, ulja biljnog i životinjskog porijekla. [1]

4.2.3. Kruta maziva

Kruta maziva su maziva u obliku praha koja se koriste dispergirana u vodi ili u ulju te pomoću njih postižemo faktor trenja kao kod postojanja dobrog graničnog sloja. Najčešće se koriste za podmazivanje u ekstremnim uvjetima. Najpoznatija maziva iz ove grupe su MoS_2 i grafit, a uz njih još se upotrebljavaju i volframov, titanov i cinkov sulfid te nitrid bora. [1]

4.2.4. Filmovi (folije) i lakovi

Filmovi i folije se kao maziva koriste najčešće u podmazivanju limova na koje se oni nanose odgovarajućim postupcima te tvoje granični sloj. Mogu se i naljepljivati neposredno prije početka deformacijskog procesa. Materijali koji se najčešće koriste kao ova vrsta maziva su polietilen, polipropilen te akrilne smole. Još jedan materijal koji može tvoriti zaštitni film je tekući termoplast. On kombiniran s omekšivačima i stabilizatorima smanjuje utjecaj povišene temperature tokom postupka na materijal. Ta smjesa nanosi se na materijal tako što se materijal uroni u tekući termoplast koji nakon sušenja tvori prevlaku u obliku folije. [1]

Lakovi kao sredstva za podmazivanje mogu se javiti u dvije varijante. Jedna su lakovi koji se skidaju s materijala nakon postupka deformacije, a drugi se ne skidaju te ostaju na površini i nakon postupka. Lakovi se koriste kod postupaka oblikovanja deformiranjem koji se provode u hladnom stanju. Lakovi koji se skidaju s materijala nakon postupka načinjeni su na bazi vinil klorida ili na bazi celuloznih spojeva, a oni koji se ne skidaju s materijala se načinjeni na bazi otopina umjetnih smola. [1]

4.2.5. Soli i stakla

Soli i stakla se kao maziva upotrebljavaju najčešće kod postupaka oblikovanja deformiranjem koji se provode u toplom stanju. Ova vrsta maziva značajno ovisi o temperaturi taljenja stakla. Naime, kao što je prije navedeno, viskoznost tekućina mijenja se s porastom temperature, što je temperatura viša, viskoznost je niža, te tako kod temperature oblikovanja metala u toplom stanju staklo mora postići odgovarajuću viskoznost kako bi moglo tvoriti zadovoljavajući granični sloj. [1]

5. PLANIRANJE PROCESA ISPITIVANJA TE ISPITIVANJE UTJECAJA 3 VRSTA MAZIVA U POSTUPKU DUBOKOG VUČENJA

5.1. Maziva korištena za ispitivanje

Za ispitivanje su korištene 3 vrste maziva proizvođača Castrol. Prvo mazivo je naziva Iloform TDN 81, a druga dva maziva su istog naziva Magna, ali različitih viskoznosti.

Slika 26. Korištena maziva

5.1.1. Mazivo Iloform TDN 81

Mazivo Iloform TDN 81 proizvođaća Castrol je viskozno ulje s visokim sadržajem aditiva za pospješivanje mazivosti i EP aditiva na bazi klora. EP (extreme pressure) aditivi su aditivi za ekstremne pritiske čija je funkcija da povećaju otpornost maziva na visoka naprezanja tokom procesa te da smanjuju trenje i trošenje u procesu. Primjenjuje se kod najtežih postupaka oblikovanja deformiranjem koja uključuju vrlo velika tlačna i smična naprezanja na površinu obratka. Ovo mazivo daje izvrsne rezultate kod dubokog vučenja različitih materijala, hladne redukcije cijevi gdje dolazi do značajnih redukcija promjera i debljina stijenki. Može se nanositi ručno, pomoću valjaka za nanošenje ili putem reciklirajućih sustava. [5]

Najveća prednost ovog maziva su izvrsna svojstva kod uvjeta graničnog podmazivanja čiji je rezultat dobra kvaliteta oblikovane površine. Zbog visokog udjela EP aditiva izrazito je smanjeno i usporeno trošenje alata i matrice. Prikladno je za oblikovanje različitih materijala te se lagano uklanja primjenom alkalnih odmašćivača. U tablici ispod navedena su najvažnija fizikalna svojstva ovog maziva. [5]

Tablica 3. Karakteristična fizikalna svojstva maziva Iloform TDN 81

Izgled	Bistra jantarna tekućina
Gustoća pri 15 °C (kg/m^3)	1170
Kinematička viskoznost pri 40 °C (mm^2/s)	135-165
Plamište (°C)	>170
Točka tečenja (°C)	-9

5.1.2. Maziva Magna

Gradacije ulja naziva Magna proizvođača Castrol su ulja za podmazivanje opće namjene. Sastoje se od visoko kvalitetnog baznog ulja bez aditiva. Zbog tog visoko kvalitetnog baznog ulja posjeduju visoku otpornost na oksidaciju i dobra svojstva izdvajanja vode. Široka je primjena ovih ulja, a valja istaknuti da se koriste kod postupaka oblikovanja deformiranjem gdje se javljaju veća opterećenja te za podmazivanje ležajeva i vretena. Ukupno postoji 10 vrsta ulja Magna, za potrebe istraživanja korištene su dvije, Magna 2 i Magna 220. [4]

Najznačajnije prednosti ovih ulja su visoka otpornost na oksidaciju, visoko plamište što omogućuje primjenu u sustavima gdje je bitno što manje isparavanja ulja te niska točka tečenja što je osobito bitno kod sustava gdje prevladaju uvjeti niskih temperatura. [4]

Tablica 4. Karakteristična fizikalna svojstva maziva Magna 2 i Magna 220

Magna	**2**	**220**
Kinematička viskoznost pri 40 °C (mm^2/s) pri 100 °C (mm^2/s)	 2 -	 220 18,7
Indeks viskoznosti	-	97
Gustoća pri 15 °C (kg/dm^3)	0,82	0,89
Točka tečenja (°C)	-39	-16
Plamište (°C)	85	264

5.2. Stroj na kojem je ispitivanje provedeno

Ispitivanje maziva provedeno je na dvoradnoj hidrauličnoj preši za duboko vučenje proizvođača Hydrauma. Model stroja je Hydrauma PYE 40. U narednoj tablici navedene su osnovne karakteristike stroja. [11]

Tablica 5. Osnovne karakteristike stroja

Kapacitet (t)	40
Brzina bata (mm/s)	83
Dimenzije stola (mm)	560 x 500
Promjer bata (mm)	40
Maksimalna visina vretena bata (mm)	65

Slika 27. Stroj za duboko vučenje

5.3. Plan ispitivanja i tehnološki uvjeti ispitivanja

Ispitivanje je provedeno u hladnom stanju, dakle pri sobnoj temperaturi. Materijal na kojem je provedeno ispitivanje bila je rondela od dekapiranog lima debljine 2,5 mm, početnog promjera 70 mm koja je u jednoj fazi duboko vučena u posudu promjera 40 mm. Dekapirani lim je vrsta čeličnog lima niskog sadržaja ugljika, male čvrstoće i visoke istezljivosti te površina takvog lima mora biti kemijski obrađena. Mjerena je maksimalna sila potrebna za proces dubokog vučenja. Kako bi se dobili što točniji rezultati, ispitivanje sile dubokog vučenja ponovljeno je sa svakim pojedinim mazivom 3 puta, a ukupni rezultat predstavlja aritmetičku sredinu tri mjerenja. Podmazivanje je izvršeno na način da je običnom krpom uljem premazana cijela površina rondele. Prilikom izmjene korištenog maziva površina alata pažljivo je očišćena kako ne bi došlo do prisustva prethodno korištenog maziva što bi možda rezultiralo pogrešnim rezultatima ispitivanja. Brzina kretanja bata tokom ispitivanja iznosila je 85 mm/s što je i nazivna brzina kretanja bata te nju nije moguće mijenjati.

5.4. Pretpostavka ponašanja maziva u procesu dubokog vučenja

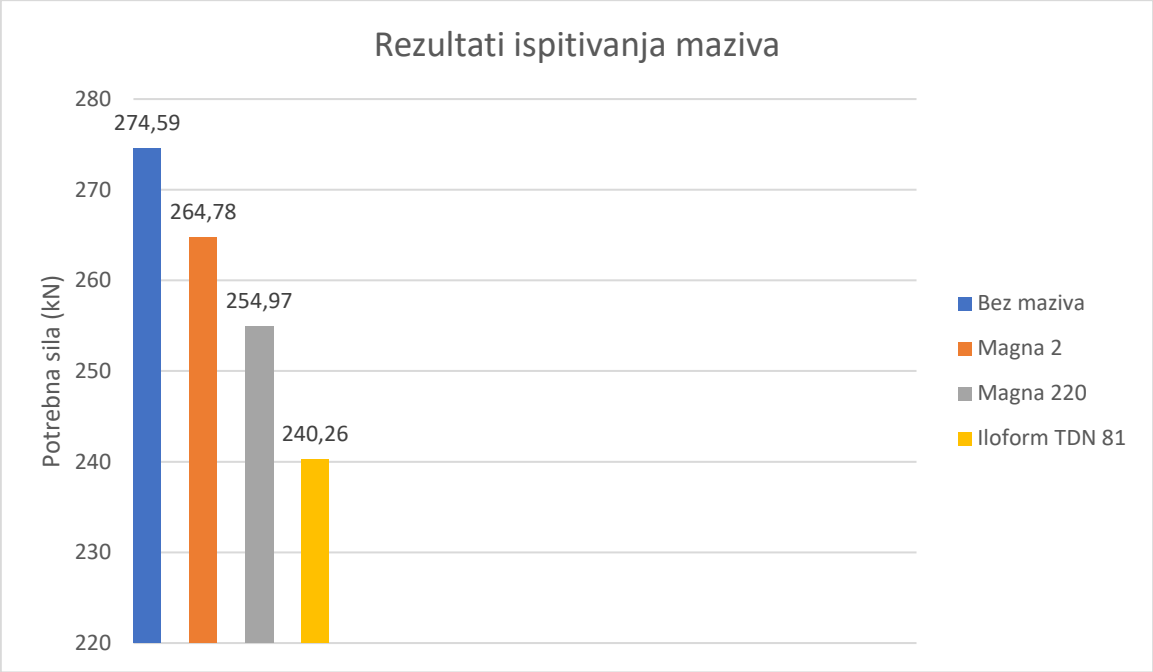
Prije samog ispitivanja donesene su određene pretpostavke u vezi ponašanja određenih maziva tijekom procesa dubokog vučenja. Pošto je mazivo Iloform TDN 81 namijenjeno za korištenje u procesima oblikovanja deformiranjem te sadrži EP aditive čija je funkcija da između ostaloga, smanjuju trenje tokom procesa, pretpostavlja se da će upravo to mazivo postići najbolji rezultat ispitivanja. Pošto maziva iz Magna gradacije nisu direktno namijenjena za korištenje u procesima oblikovanja deformiranjem, pretpostavlja se da će maksimalna sila dubokog vučenja kod ispitivanja s tim mazivima biti nešto veća u odnosu na ispitivanje s mazivom Iloform TDN 81. Također, s obzirom da je viskoznost maziva Magna 220 nešto viša od viskoznosti maziva Magna 2, pretpostavlja se da će se mazivo Magna 220 teže „razlijevati“ i istisnuti s površine obratka te tako i izrazitije smanjiti trenje u procesu u odnosu na mazivo Magna 2 te proporcionalno tome i smanjiti maksimalnu silu dubokog vučenja.

5.5. Rezultati ispitivanja i preporuke

Rezultati ispitivanja svakog pojedinog maziva su pokazali značajne međusobne razlike te potvrdili ranije donesene pretpostavke. Dobiveni rezultati ispitivanja prikazani su ispod tablično i grafički.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja maziva

Mazivo	Prosječni iznos maksimalne potrebne sile dubokog vučenja (kN)
Bez maziva	274,59
Magna 2	264,78
Magna 220	254,97
Iloform TDN 81	240,26



Slika 28. Grafički prikaz rezultata ispitivanja maziva

Iz rezultata je vidljivo da je najmanja sila dubokog vučenja potrebna kod maziva Iloform TDN 81 koje posjeduje određene aditive za duboko vučenje te je specifično namijenjeno za postupke oblikovanja deformiranjem. Maziva gradacije Magna postigla su nešto slabije rezultate od maziva Iloform TDN 81, ali opet se vidi određena razlika u odnosu na ispitivanje kad mazivo nije bilo korišteno. Te je jasno da je mazivo više viskoznosti Magna 220 postiglo nešto bolji rezultat od maziva niže viskoznosti Magna 2 što je bilo i očekivano. Budući da je zbog stanja naprezanja i velikog udjela trenja u ukupnim naprezanjima u materijalu svakako potrebno koristiti mazivo u procesima dubokog vučenja, a s obzirom na dobivene rezultate, preporučuje se koristiti maziva s aditivima za duboko vučenje, no ukoliko se takvo mazivo ne posjeduje, poželjno je koristiti bilo kakvo s potencijalno što većom viskoznosti. Ukoliko usporedimo mazivo s najslabijim rezultatom ispitivanja te rezultat ispitivanja bez maziva vidimo da je razlika u sili dubokog vučenja nešto manja od 10 kN što nikako nije zanemarivo. Razlika između ispitivanja bez maziva i ispitivanja s mazivom koje je postiglo najbolji rezultat iznosi 34,33 kN što je 12,5%. To je zaista značajna razlika i sila koju uštedimo koristeći takvo mazivo je velika. Uz to što trošimo manje energije, značajno možemo usporiti trošenje alata koristeći pravilno mazivo te nam to može pružiti velike uštede u našem proizvodnom procesu, osobito ukoliko proizvodimo velike serije, što je veća serija to su veće i uštede. Postotna razlika između maziva Magna 2 i Magna 220 iznosi 3,7 %, dok je razlika između Magna 220 i Iloform TDN 81 5,77 %, a između Magna 2 i Iloform TDN 81 9,26%.

6. ZAKLJUČAK

Ukoliko želimo ostati konkurentni u današnjem svijetu industrije, troškove proizvodnje moramo svesti na minimum. Postupci oblikovanja deformiranjem široko su rasprostranjeni u industriji te spadaju u granu industrije gdje se proizvodi proizvode u vrlo velikim serijama. Ukoliko imamo velike serije znači da moramo u potpunosti optimizirati naš proces kako bi gubitke u proizvodnji umanjili što je više moguće. Kod velikih serija moramo paziti na svaki detalj koji nam potencijalno može biti gubitak pošto taj pojedini gubitak, pomnožen s brojem proizvedenih proizvoda koji se kreće u stotinama tisuća čini velik broj. Trenje je neizbježna pojava u oblikovanju deformiranjem te nam ono često stvara neizbježne gubitke u vidu veće potrošnje energije, negativnog utjecaja na površine obradaka te prerano trošenje alata. Napretkom tehnologije i znanosti dobili smo mogućnost detaljno proučiti pojavu trenja i njezin utjecaj na procese te smo dobili saznanja na koji način to trenje u našim procesima možemo minimizirati. Tako je dokazano da se u postupku dubokog vučenja ukupno potrebno naprezanje u limu za njegovu pravilnu deformaciju može povećati i do 60% baš zbog trenja. Mi to moramo smanjiti na odgovarajući način jer takvo povećanje naprezanja sa sobom vuče i prerano trošenje alata i povećanu potrebu za energijom. Najučinkovitiji način smanjenja negativnog utjecaja trenja je korištenjem optimalnog maziva u procesu. Danas postoji čitav niz načina podmazivanja i maziva koje možemo koristiti. Provedenim istraživanjem uspoređena su tri maziva, Magna 2, Magna 220 te Iloform TDN 81. Mazivo Iloform TDN 81 postiglo je najbolji rezultat i to za 5,77% u odnosu na mazivo Magna 220 te za 9,26% u odnosu na mazivo Magna 2. Naravno da je uvijek bolje koristiti bilo kakvo mazivo nego nikakvo, no ovi postotci govore da su i između maziva velike razlike koje kod velikih serija vrlo brzo dođu do izražaja. Svaka tvrtka koja se bavi oblikovanjem deformiranjem mora biti svjesna ovih činjenica te bi morala obratiti veliku pozornost na odabir optimalnog maziva korištenog tijekom procesa. Naravno da kod malih serija to možda i nije toliko važno, no kod velikih serije mogu se postići velike uštede te tako postati konkurentniji na tržištu, a novac koji bi bio potrošen na prečeste izmjene alata ili na višak potrošene energije iskorišten za modernizaciju pogona, veće plaće za djelatnike ili na neki drugi način koji bi za tu tvrtku u tom periodu bio najbolji.

7. LITERATURA

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

[2] Math, M. : *Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[3] Pavličić, L. : *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[4] *Podaci o proizvodu Magna*, ABC maziva, Zagreb, 2018.

[5] *Podaci o proizvodu Iloform TDN 81*, ABC maziva, Zagreb, 2018.

[6] Grilec, K. : *Podloge za predavanja iz kolegija Tribologija*, Zagreb, 2019.

[7] https://www.massivumformung.de/1/industry/history-of-metal-forming/

[8] https://pure.tue.nl/ws/files/3668381/458460.pdf

[9] https://hr.wikipedia.org/wiki/Trenje

[10] https://www.aptint.com/en/used-second-hand-machinery/open-gap-presses/wmw-hydrauma-pye-40_57

[11] *Katalog preše*, Hydrauma.

[12] https://www.historytoday.com/archive/focus/schmiedhammer-fritz

[13] http://www.hd-blyy.com/fwzc.asp.htm

[14] https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeIPodmazivanje.pdf

[15] https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-boundary-mixed-and-hydrodynamic-friction-regimes_fig9_330439143

[16] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X99000559

[17] https://onyxinsight.com/wind-turbine-failures-encyclopedia/gear-failures/abrasive-wear/

[18] https://jgs-nitriding.com/index.php/2014-09-09-14-47-03/methods-of-surface-failure/26-surface-fatigue-wear

[19] https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjanje

[20] http://ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr/upload/ss-industrijska-strojarska-zg/multistatic/49/8.%20Alati%20za%20preoblikovanje.pdf

[21] https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/extrusion-powders

[22] https://www.pixwords.solutions/hr/rje%C5%A1enje/kovanje

[23] http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=33539

[24] Keran, Z. :*Predavanja iz kolegija Oblikovanje deformiranjem*, Zagreb, 2017.

[25] https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html

[26] https://strojarskaradionica.wordpress.com/2018/03/28/na-koji-nacin-racunamo-indeks-viskoznosti-iv/

8. PRILOZI

I. CD-RW disc