

Postupak dubokog vučenja lima

Hrastić, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:940448>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dario Hrastić

Zagreb, 2021. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Petar Piljek

Student:

Dario Hrastić

Zagreb, 2021. godina

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

Zahvaljujem mentoru, doc. dr. sc. Petru Piljeku, na pruženoj stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade rada. Također, zahvaljujem laborantu Laboratorija za oblikovanje deformiranjem, Mateju Šavoru na pruženoj pomoći pri izradi eksperimentalnoga dijela rada.

Zahvaljujem cijeloj obitelji na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Dario Hrastić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DARIO HRASTIĆ**

Mat. br.: 0035211000

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Postupak dubokog vučenja lima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The process of deep drawing of sheet metal**

Opis zadatka:

Duboko vučenje je postupak oblikovanja deformiranjem u hladnom stanju kod kojeg se iz metalnog lima izrađuju razni tankostjeni proizvodi. Zahvaljujući svojim prednostima u pogledu primjene na raznovrsnim materijalima, velike točnosti i ponovljivosti te mogućnosti postizanja kompleksnih geometrija uz veliku brzinu izrade i niskih troškova proizvodnje, postupci dubokog vučenja su neizostavni u suvremenoj serijskoj proizvodnji metalnih dijelova, pogotovo u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Navesti i opisati temeljne pojmove i teorijske osnove vezane uz postupak dubokog vučenja.
2. Proučiti, sistematizirati, opisati i shematski prikazati različite izvedbe najčešće korištenih alata s obzirom na vrstu stroja na kojem se postupak obavlja te navesti glavne karakteristike i načine rada stroja.
3. Obratiti pozornost na korištene materijale, trenje i naprezanja koja se javljaju tijekom procesa dubokog vučenja te provesti analitičku analizu i proračun sile dubokog vučenja.
4. Eksperimentalno provesti postupak prve faze dubokog vučenja za izradu simetričnog cilindričnog proizvoda iz čeličnog lima te eksperimentalne rezultate usporediti s rezultatima dobivenim analitičkom analizom.
5. Zaključak.

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

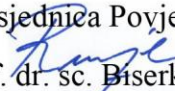
Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predvideni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Petar Piljek

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU.....	1
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1. UVOD.....	1
2. TEORETSKE OSNOVE OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM.....	2
2.1. Teorija oblikovanja deformiranjem.....	2
2.2. Osnovni pojmovi oblikovanja deformiranjem.....	2
2.3. Osnovni zakoni deformiranja.....	4
2.4. Plastična deformacija.....	5
2.5. Plastično tečenje materijala.....	9
2.5.1. Uvjet plastičnog tečenja.....	11
2.6. Utjecaj trenja.....	12
2.6.1. Teorija trenja.....	12
2.6.2. Tehnološka maziva.....	14
2.7. Podjela postupaka oblikovanja deformiranjem.....	15
3. DUBOKO VUČENJE.....	17
3.1. Postupak dubokog vučenja.....	20
3.2. Materijali za duboko vučenje.....	22
3.3. Naprezanja i proračun.....	23
3.3.1. Pritisak tlačnog prstena.....	26
3.3.2. Ukupno naprezanje.....	27
3.4. Stupanj deformacije.....	28
3.5. Strojevi i alati za duboko vučenje.....	30
3.5.1. Preše za duboko vučenje.....	30
3.5.2. Alat za duboko vučenje.....	34
3.6. Trenje i podmazivanje u procesu dubokog vučenja.....	35
3.7. Greške u postupku dubokog vučenja.....	37
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	39
4.1. Postupak prve faze dubokog vučenja.....	39
4.2. Analitička analiza.....	42
4.3. Rezultati.....	45
4.3.1. Rezultati analitičke analize.....	45
4.3.2. Rezultati mjerenja sile na preši.....	46

4.4. Analiza rezultata	49
5. ZAKLJUČAK	51
LITERATURA	53

POPIS SLIKA

Slika 1. Promjene dimenzija tijela pri deformiranju silom F [2]	3
Slika 2. Dijagram razvlačenja metalnog duktilnog materijala [4]	5
Slika 3. Tipovi kristalne rešetke: a) prostorno centrirana; (b) plošno centrirana; (c) heksagonska [2].....	6
Slika 4. Stvaranje polikristalnog materijala [9].....	7
Slika 5. Shematski prikaz deformiranja klizanjem [4]	8
Slika 6. Shematski prikaz deformiranja blizančenjem [4].....	8
Slika 7. Krivulja razvlačenja i plastičnog tečenja [11]	10
Slika 8. Model trenja prema Bowden-Taboru [2]	12
Slika 9. Podjela postupaka deformiranja prema vrsti naprezanja [11].....	15
Slika 10. Postupci oblikovanja s obzirom na oblik sirovca [11].....	16
Slika 11. Dva tipa dubokog vučenja [13]	17
Slika 12. Osnovni oblici dijelova koji se proizvode postupkom dubokog vučenja [12]	18
Slika 13. Kutijasti proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja [12].....	19
Slika 14. Proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja: Automobilska karoserija [14]	19
Slika 15. Proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja: Posuđe [15].....	19
Slika 16. Proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja: Čahura metka [16].....	19
Slika 17. Proces dubokog vučenja [6]	20
Slika 18. Shematski prikaz faktora u procesu dubokog vučenja [13]	21
Slika 19. Shema naprezanja u stijenci posude koja se podvrgava dubokom vučenju [4]	24
Slika 20. Naprezanja lima kod procesa dubokog vučenja [4].....	25
Slika 21. Faze dubokog vučenja i maksimalne redukcije presjeka ronđele [17]	29
Slika 22. Proizvodnja limenke u više faza [17].....	30
Slika 23. Podjela preša prema načinu rada [6].....	31
Slika 24. Tipični proizvodi nastali na jednoradnoj preši [22].....	31
Slika 25. Tipični proizvodi nastali na dvoradnoj preši [22]	32
Slika 26. Mehanička preša za duboko vučenje [23].....	32
Slika 27. Hidraulička preša za duboko vučenje [23].....	33
Slika 28. Alat za duboko vučenje na jednoradnoj preši [6]	34
Slika 29. Alat za duboko vučenje na višeradnoj preši [6]	35
Slika 30. Stvaranje nabora na rubovima posude podvrgnute postupku dubokog vučenja [12]	38

Slika 31. Nejednaka visina posude te stvaranje uške [28].....	38
Slika 32. Pucanje lima na dnu posude [12].....	38
Slika 33. Hidraulička preša za duboko vučenje	39
Slika 34. Alat hidrauličke preše za duboko vučenje	40
Slika 35. Rondela za eksperimentalni postupak dubokog vučenja	41
Slika 36. Proizvod nakon prve faze dubokog vučenja	42
Slika 37. Snimljena krivulja plastičnog tečenja i tehnički podaci materijala St 34 [29].....	43
Slika 38. Grafički prikaz prosječne vrijednosti sile tlačnog prstena s obzirom na hod alata ...	48
Slika 39. Grafički prikaz prosječne sile dubokog vučenja s obzirom na hod alata.....	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Korištena maziva u procesu dubokog vučenja za različiti tip materijala [13].....	36
Tablica 2. Dimenzije alata za duboko vučenje	40
Tablica 3. Tehnički podaci ronđele	41
Tablica 4. Rezultati prvog mjerenja	46
Tablica 5. Rezultati drugog mjerenja	47
Tablica 6. Rezultati trećeg mjerenja.....	47
Tablica 7. Prosječni rezultati mjerenja	48
Tablica 8. Podaci dobiveni mjerenjem i analitičkom analizom	50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
a_0	mm	početna dužina tijela
a_1	mm	konačna dužina tijela
b_0	mm	početna širina tijela
b_1	mm	konačna širina tijela
c	mm	zračnost između žiga i matrice
D_0	mm	početni promjer rondele
D_1	mm	promjer posude nakon prve faze
D_m	mm	promjer matrice
D_z	mm	promjer žiga
E	N/mm ²	modul elastičnosti
F	N	sila dubokog vučenja
F_{pr}	N	sila tlačnog prstena
F_{tr}	N	sila trenja
h_0	mm	početna visina tijela
h_1	mm	konačna visina tijela
k_f	N/mm ²	naprezanje plastičnog tečenja
k_{fm}	N/mm ²	srednje naprezanje plastičnog tečenja
m		koeficijent redukcije
m_1		koeficijent redukcije prve faze
n		koeficijent očvršćenja
N	N	normalna sila na dodirnu površinu
p_{pr}	N/mm ²	pritisak tlačnog prstena
R		normalna izotropija koja povezuje stanjenje i istežanje lima
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
R_p	N/mm ²	granica popuštanja
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvencionalna granica popuštanja
r_m	mm	radijus zaobljenja matrice
r_z	mm	radijus žiga
s	mm	debljina lima
T_t	K	temperatura tališta
V_0	mm ³	početni volumen tijela
V_1	mm ³	konačni volumen tijela
v	mm/s	brzina žiga
α	rad	kut matrice
ε_h		relativan stupanj deformacije visine tijela

ε	mm/mm	deformacija
μ		faktor trenja
σ	N/mm ²	inženjersko naprezanje
σ_t	N/mm ²	tangencijalno naprezanje
σ_r	N/mm ²	radijalno naprezanje
σ_r'	N/mm ²	naprezanje uslijed plastične deformacije i djelovanja tlačnog prstena
σ_r''	N/mm ²	naprezanje uslijed prijelaza preko radijusa zaobljenja
σ_{sav}	N/mm ²	naprezanje uslijed savijanja
σ_{uk}	N/mm ²	ukupno naprezanje
τ_{max}	N/mm ²	maksimalno smično naprezanje
φ_a		logaritamski stupanj deformacije dužine tijela
φ_b		logaritamski stupanj deformacije širine tijela
φ_h		logaritamski stupanj deformacije visine tijela
φ_0		logaritamski stupanj deformacije na početku procesa
φ_1		logaritamski stupanj deformacije na kraju prve faze
ψ		stupanj redukcije

SAŽETAK

Obrada metala deformiranjem od metalnog doba pa do danas ima važnu ulogu u životu čovjeka jer se plastičnom deformacijom krutim metalima mijenja oblik, ali i mehanička svojstva. Tehnologiju oblikovanja deformiranjem karakterizira visoka produktivnost, dimenzijska točnost i visoka kvaliteta površine proizvoda te mogućnost proizvodnje bez gubitka materijala. Kako bi se pronašle i razradile metode za proračun naprezanja, deformacijskih sila i deformacijskog rada u postupcima oblikovanja deformiranjem potrebno je poznavati teoriju oblikovanja deformiranjem.

Jedan od najzastupljenijih postupaka oblikovanja deformiranjem je duboko vučenje kod kojeg se iz metalnog lima izrađuju tankostjeni proizvodi. Dubokim vučenjem se velikom brzinom i niskim troškovima proizvodnje dobivaju proizvodi raznovrsnih materijala te velike točnosti i kompleksne geometrije koji su prisutni u suvremenoj serijskoj proizvodnji metalnih dijelova.

Cilj rada je upoznati postupak dubokog vučenja te usporediti eksperimentalne rezultate sile dubokog vučenja s rezultatima dobivenim analitičkom analizom. U svrhu ostvarivanja cilja rada, eksperimentalno je proveden postupak prve faze dubokog vučenja za izradu simetričnog cilindričnog proizvoda i analitička analiza istog.

Ključne riječi: oblikovanje deformiranjem, duboko vučenje, prva faza dubokog vučenja, sila dubokog vučenja

SUMMARY

Metal forming processes from the metal age until today have an important role in human life because plastic deformation of solid metals changes the shape, but also the mechanical properties. Forming technology is characterized by high productivity, dimensional accuracy, and high surface quality of the product, as well as the possibility of production without loss of material. In order to find and develop methods for the calculation of stresses, deformation forces and deformation work in forming processes, it is necessary to know the theory of deformation forming.

One of the most common deformation forming processes is deep drawing, in which thin-walled products are made of sheet metal. Deep drawing produces products of various materials and high accuracy and complex geometry, which are present in modern serial production of metal parts, at high speed and low production costs.

The aim of this paper is to know the deep drawing procedure and to compare the experimental results of the deep drawing force with the results obtained by analytical analysis. In order to achieve the goal of the work, the procedure of the first phase of deep drawing for the production of a symmetrical cylindrical product and its analytical analysis was performed experimentally.

Key words: forming proces, deep drawing, first phase of deep drawing, deep drawing force

1. UVOD

U strojarskoj praksi, najčešći materijali u preradi i konstrukciji su metali koji imaju svoja mehanička, antikorozivna i druga svojstva te se mogu oblikovati na različite načine. Oblikovanje metala deformiranjem je proizvodni postupak kojim se čvrstom metalu, bilo sirovom odljevku ili već preoblikovanom proizvodu, plastičnom deformacijom mijenja oblik, a može i struktura materijala. Navedeni postupak je najstariji način oblikovanja metala i legura te spada u postupke preoblikovanja. [1]

Čovjek je u razdoblju metalnog doba, susrećući se s različitim materijalima i spoznajom da se materijal pod utjecajem vanjske sile može preoblikovati, razvio prve primitivne postupke oblikovanja deformiranjem. Na taj način izrađivao se alat, oružje, novac, čaše i ostali potrebni metalni predmeti. Napredovanje tehnike obrade metala deformiranjem nastupilo je u srednjem vijeku razvojem obrta. Razvili su se mehanički batovi pogonjeni snagom vode te je započeo razvoj kovačkih preša za kovanje novca i preradu lima. [2]

Industrijalizacija je omogućila ubrzan razvoj obrade metala deformiranjem koji nije bio moguć bez teorijske podloge, stoga je tridesetih godina prošlog stoljeća započeo razvoj teorije oblikovanja deformiranjem koja se zasniva na zahtjevima za kvalitetu proizvoda te usavršavanju i optimiziranju tehničko-ekonomskih pokazatelja postupaka prerade. [2], [3]

Teorija oblikovanja deformiranjem proučava metode proračuna deformacijskih sila, rada i naprezanja u postupku oblikovanja metala i legura deformiranjem. Preko 85 % proizvedenog čelika te 90 % obojenih metala i njihovih legura prerađuje se postupcima oblikovanja deformiranjem. Svaki proces oblikovanja deformiranjem odvija se po određenim zakonima, čijim se poznavanjem isti može opisati. [3]

Jedna od tehnologija kojom se masovno proizvode različite posude, kutije, automobilske karoserije itd. je duboko vučenje. Ukratko, riječ je o proizvodnji limene robe i preradi lima. Oblikovanje deformiranjem je izuzetno važna tehnologija s društvenog i gospodarskog aspekta zbog visoke efektivnosti oblikovanja, postizanja visoke dimenzijske točnosti i kvalitete površina proizvoda, proizvodnje izradaka specifičnih fizikalnih i mehaničkih svojstava te mogućnosti proizvodnje bez gubitaka materijala. [2]

Cilj ovog rada je opisati postupak dubokog vučenja te definirati pojmove i teorijske osnove vezane uz navedeni postupak oblikovanja deformiranjem. Radi boljeg razumijevanja eksperimentalno je proveden postupak prve faze dubokog vučenja simetričnog cilindričnog proizvoda.

2. TEORETSKE OSNOVE OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM

2.1. Teorija oblikovanja deformiranjem

Teorija oblikovanja deformiranjem je znanstvena disciplina koja proučava u kakvom su odnosu parametri deformacije sa strukturnim karakteristikama i mehaničkim svojstvima materijala. Dakle, glavni joj je zadatak pronaći i razraditi metodu za proračun naprezanja, deformacijskih sila i deformacijskog rada u postupcima oblikovanja deformiranjem. [2], [3]

Razvoj teorije oblikovanja deformiranjem krenuo je u sljedećim pravcima: [2]

1. Mehaničko-matematički pristup - koristi mehaniku kontinuuma i teoriju plastičnosti pomoću kojih se izračunavaju sila i rad deformacije potrebni za dimenzioniranje stroja i projektiranje tehnološkog procesa.
2. Fizikalni pristup - omogućuje razumijevanje nastanka i tijeka plastične deformacije, određivanje strukture metala na temelju tijeka i veličine deformacijskog procesa, određivanje otpora deformaciji te deformiranosti ovisno o temperaturi i brzini deformacije.
3. Fizikalno-kemijski pristup - omogućuje spoznaju o zakonitostima trenja te njihovog utjecaja na deformacijsku silu i efekt trošenja.

Danas je moguće upravljanje deformacijskim procesima u proizvodnji na temelju spoznaja svih pristupa. [2]

2.2. Osnovni pojmovi oblikovanja deformiranjem

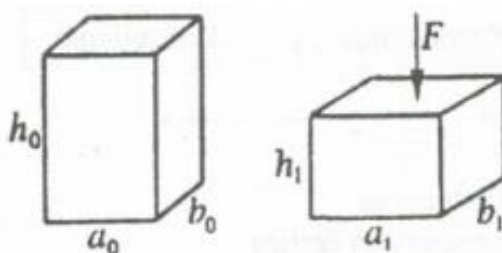
Cilj tehnologije oblikovanja deformiranjem je promijeniti materijalu oblik i dimenzije bez pojave loma, stoga je važno razumjeti, procijeniti i utvrditi koliku deformaciju je materijal spreman podnijeti, a da pri tome ne dođe do njegova loma. U cilju razumijevanja tehnologije oblikovanja deformiranjem definirat će se pojmovi koji se susreću prilikom opisa postupaka oblikovanja deformiranjem. [2]

Plastičnost definira sposobnost deformacije bez pojave loma te predstavlja prirodno svojstvo materijala koje se ne mjeri. [4]

Duktilnost je svojstvo materijala da se plastično deformira bez pojave loma, a mjeri se različitim ispitivanjima. [3]

Deformacija je relativna promjena položaja čestice nekog tijela, gdje uslijed djelovanja sile dolazi do tečenja materijala koje se manifestira gibanjem čestica. Prema vrstama deformacije razlikuju se linijska deformacija ili produljenje te kutna ili smična deformacija. Ukupna deformacija sastoji se od linijske i kutne deformacije. Također, postoje elastične i plastične deformacije. Ako vanjske sile pređu određenu granicu dolazi do pomaka atoma. Kada prilikom rasterećenja deformacija ne nestaje, nego promjena oblika i dimenzija materijala budu trajne, govori se o plastičnoj deformaciji. Ako deformacija nakon prestanka djelovanja opterećenja nestaje i atomi se vrate u prvobitan položaj govori se o elastičnoj deformaciji. [2]

Stupnjem deformacije se izražava promjena dimenzija, poprečnih presjeka i obujma tijela uslijed djelovanja vanjskih sila. Prikazano je sabijanje silom F tijela početnih dimenzija a_0 , b_0 , h_0 [Slika 1]. Kao rezultat se dobije tijelo dimenzija a_1 , b_1 , h_1 . Valja naglasiti kako je volumen tijela ostao konstantan.



Slika 1. Promjene dimenzija tijela pri deformiranju silom F [2]

Iz navedenog slijedi:

$$V_0 = V_1$$

$$h_0 \cdot a_0 \cdot b_0 = h_1 \cdot a_1 \cdot b_1 = \text{const.}$$

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

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

U jednadžbi (1) navode se logaritamski stupnjevi deformacije (φ_h , φ_a , φ_b) koji mogu biti i negativni, a njihova suma jednaka je nuli. U konkretnom slučaju stupanj deformacije u smjeru visine $\varphi_h > 0$ jer je $h_0 > h_1$, dok su ostali stupnjevi deformacije negativni. Za logaritamske stupnjeve deformacije vrijedi svojstvo aditivnosti, tj. ukupna se deformacija može dobiti zbrajanjem prethodno dobivenih deformacija. [2]

U literaturi se susreće i relativan stupanj deformacije koji se za danu sliku [Slika 1] definira formulom:

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = 1 - \frac{h_1}{h_0}, \quad (2)$$

gdje je:

ε_h relativan stupanj deformacije visine tijela.

Jednadžba (2) opisuje produljenje odnosno skraćenje materijala koji se deformira, a kao mjerna jedinica može se koristiti postotak. Usporedbom logaritamskog stupnja i relativnog stupnja deformacije slijedi:

$$\frac{h_1}{h_0} = e^{-\varphi h}. \quad (3)$$

Razvije li se $e^{-\varphi h}$ u red, zaključuje se da je kod malih stupnjeva deformacije logaritamski stupanj približno jednak relativnom. [2], [5]

2.3. Osnovni zakoni deformiranja

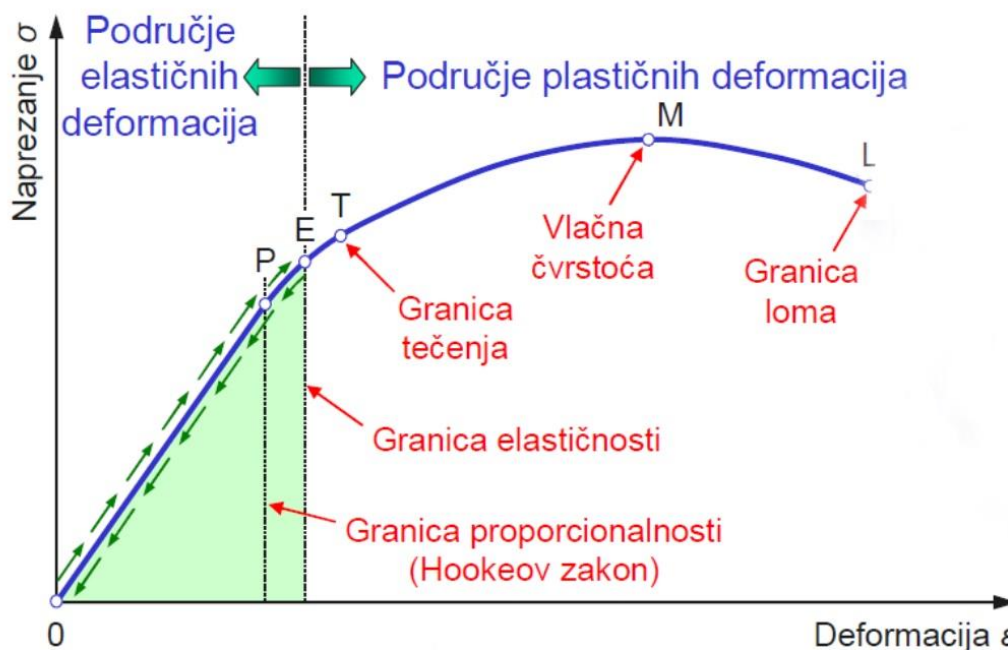
Postoje određeni zakoni prema kojima se odvija proces oblikovanja deformiranjem. Ti zakoni omogućuju opis i analizu procesa deformacije koji se odvija u materijalu.

Osnovni zakoni koji se koriste u procesima oblikovanja deformiranjem su: [3]

1. Zakon o konstantnom volumenu - govori da je volumen proizvoda na početku i na kraju procesa deformacije jednak.
2. Zakon najmanjeg otpora - govori da se točka deformiranog tijela uvijek giba u pravcu najmanjeg otpora ako postoji mogućnost tečenja materijala u različitim pravcima.
3. Zakon neravnomjerne deformacije i zaostalih naprezanja - govori da se u realnim uvjetima prilikom provođenja postupaka oblikovanja deformiranjem ne ostvaruje ravnomjerna deformacija, a to ima za posljedicu zaostala naprezanja.
4. Zakon sličnosti i modeliranje procesa oblikovanja deformiranjem - zasniva se na poznavanju i povezivanju deformacijskih sila, rada i raspodjele naprezanja u zoni deformacije. Samo teorijskim putem nije moguće doći do navedenih veličina, a eksperimentalni put je rijetko kad moguć. Iz tog se razloga eksperimenti obave na modelima koji ispunjavanju zakon sličnosti tj. model i radni komad su geometrijski i fizički slični te je postupak deformacije obavljen u točno određenim uvjetima.

2.4. Plastična deformacija

Tehnologija oblikovanja deformiranjem zasniva se na promjeni oblika i dimenzija čvrstog tijela postupcima trajne plastične deformacije. Tijek deformacije metalnog duktilnog materijala pod opterećenjem prikazan je dijagramom razvlačenja [Slika 2]. [6]



Slika 2. Dijagram razvlačenja metalnog duktilnog materijala [4]

Pri djelovanju malog vlačnog napreznja u smjeru jedne osi, postoji proporcionalan odnos između napreznja i deformacije. Taj odnos opisan je Hookovim zakonom:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

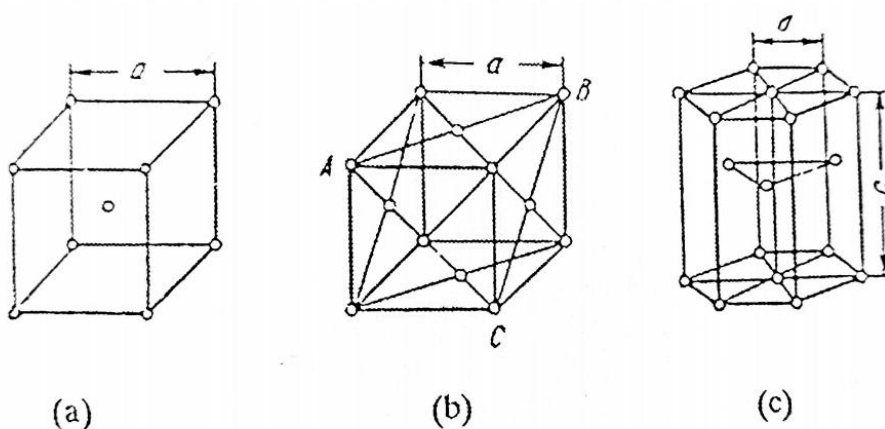
gdje je:

- σ N/mm^2 napreznje
- ε mm/mm deformacija
- E N/mm^2 modul elastičnosti.

Nastala deformacija naziva se elastična, a karakterizira je vraćanje materijala u početno stanje nakon uklanjanja opterećenja. Nastavi li se deformacija iznad granice elastičnosti ulazi se u područje plastičnih deformacija gdje napreznje nije proporcionalno deformaciji, a promjene u dimenzijama i obliku materijala ostaju trajne. [7]

Radi boljeg razumijevanja procesa potrebno je opisati mikrostrukturu materijala koji podliježe procesu obrade deformiranjem. U čvrstom agregatnom stanju metali mogu biti kristalne ili amorfne mikrostrukture. Karakteristika kristalnog stanja je pravilan, ponavljajući raspored atoma u prostoru. Slaganje atoma u kristalu može se prikazati jediničnim ćelijama triju kristalnih rešetki u kojima najčešće kristaliziraju metali, a to su [Slika 3]:

- a) prostorno centrirana kristalna rešetka
- b) plošno centrirana kristalna rešetka
- c) heksagonska kristalna rešetka.

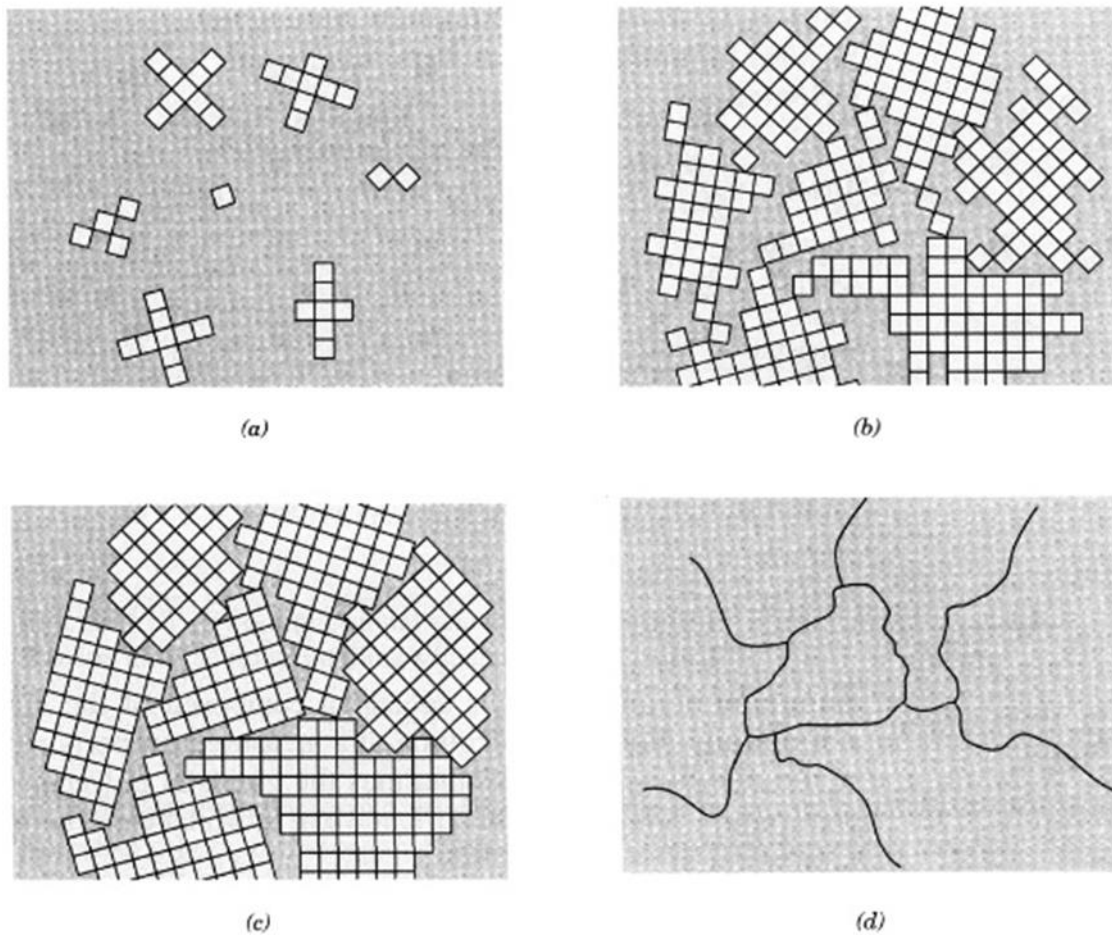


Slika 3. Tipovi kristalne rešetke: a) prostorno centrirana; b) plošno centrirana; c) heksagonska [2]

U kristalnoj rešetki postoje plohe u kojima su atomi gušće smješteni te se takve plohe nazivaju ravnine najgušće zaposjednutosti atoma. Osim ravnina postoje i pravci najgušće zaposjednutosti atoma na kojima su bliže smješteni atomi u odnosu na druge pravce. Postojanje takvih ravnina i pravaca ukazuje na to da određena mehanička svojstva kristalne rešetke ovise o ravninama i pravcima na kojima se mjere, dakle kristali pokazuju velike razlike u elastičnim i plastičnim svojstvima s obzirom na smjer njihova mjerenja. Navedena različitost naziva se anizotropija. [2], [8]

Mikrostruktura metala može se sastojati od jednog ili više kristala pa se u literaturi mogu pronaći termini polikristalni i monokristalni materijal. Češće se u industrijske svrhe koriste polikristalni materijali čije se nastajanje može zamisliti kao skrućivanje taljevine [Slika 4]. Prilikom hlađenja u taljevini se pojavljuju mala kristalna zrna [Slika 4 a] koja nastavljaju rasti [Slika 4 b] dok ne naiđu na druga kristalna zrna [Slika 4 c]. U trenutku kontakta s nekim drugim kristalnim zrnom, rast je u tom smjeru ometan i dolazi do potpune kristalizacije gdje

se kao produkt pojavljuje kristalni materijal sastavljen od velikog broja međusobno spojenih kristalnih zrna različite orijentacije [Slika 4 d]. [2], [9]



Slika 4. Stvaranje polikristalnog materijala [9]

U metalu mogu biti prisutni defekti, odnosno nesavršenosti kristalne rešetke koje donose zone manje čvrstoće.

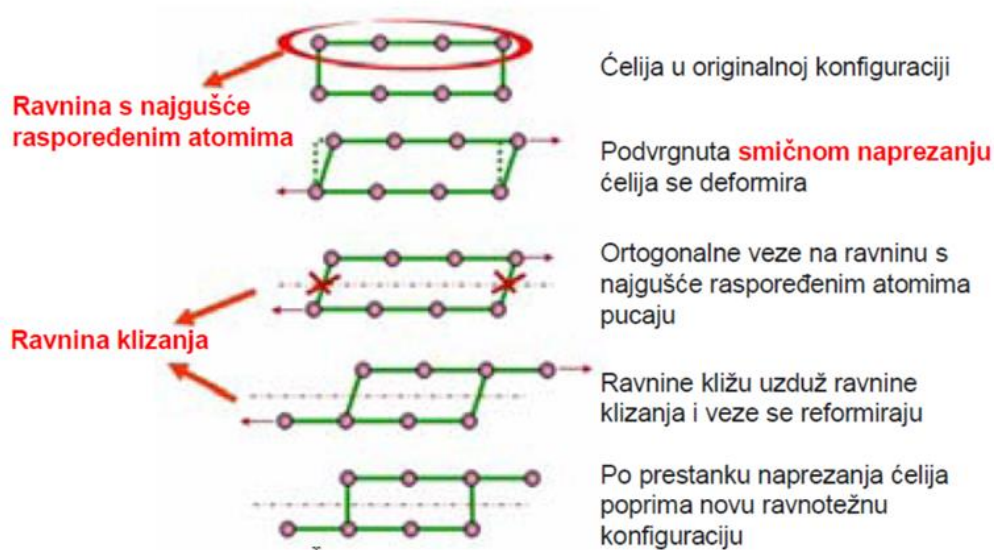
Monokristali se plastično deformiraju na dva načina: [2]

- klizanjem i
- blizančenjem.

Prema tome, proces deformiranja je uvijek izazvan smičnom komponentom djelujućeg naprežanja na obradak.

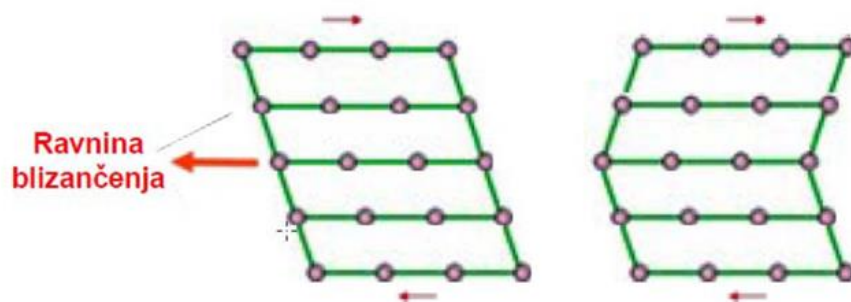
Klizanje predstavlja paralelno pomicanje slojeva monokristala u odnosu na susjedne slojeve, a odvija se po određenim kristalografskim ravninama koje se nazivaju ravnine klizanja kao što

je prikazano na slici [Slika 5]. Ravnine klizanja u kristalnoj rešetki su ravnine najgušće zaposjednutosti atoma, a pravci klizanja su pravci najgušće zaposjednutosti atoma. [2]



Slika 5. Shematski prikaz deformiranja klizanjem [4]

Slično kao i kod klizanja, blizančenje je gibanje atoma u kristalnoj rešetki koje dovodi do dijeljenja rešetke na dva simetrična, ali različito orijentirana dijela kao što je prikazano na slici [Slika 6]. Deformacija blizančenjem odvija se u ravninama blizančenja. [2]



Slika 6. Shematski prikaz deformiranja blizančenjem [4]

Klizanje se odvija postupno, od atoma do atoma, pri čemu je važno uzeti u obzir linijske nesavršenosti, odnosno dislokacije, jer one uzrokuju promjenu mehaničkih svojstava metala. Smatra se da je pomicanje dislokacija glavni mehanizam plastične deformacije jer je za to pomicanje potrebna manja sila u odnosu na istodobno pomicanje cijelog sloja atoma iz njihovog stabilnog položaja u kristalnoj rešetki. [2]

Prilikom pomicanja atoma iz stabilnog položaja potrebno je prekinuti veze između atoma koje su jake, a za to je potrebno puno energije odnosno veliko smično naprezanje. Ako su u metalu

prisutne dislokacije koje su nastale uslijed neslaganja atomskih ravnina unutar kristala, onda postoje i zone manje čvrstoće oko tih dislokacija. Nepravilan razmak između atoma kod dislokacija je poremetio vezu između atoma. Iz toga slijedi da naprezanje koje kod savršenog kristala ne bi uzrokovalo deformiranje, isto bi uzrokovalo kod kristala s dislokacijom. [10]

Gibanje dislokacije se odvija kroz cijelu kristalnu rešetku ukoliko se na putu ne nađu prepreke poput drugih dislokacija, stranih atoma, praznina i slično. Nailaskom na prepreku, gibanje dislokacije se zaustavlja te dislokacija blokira prolaz ostalim dislokacijama što uzrokuje povećan otpor deformaciji. [11]

Ranije je spomenuto kako se polikristal sastoji od velikog broja kristalnih zrna različite orijentacije. Na početku procesa deformiranja, deformacija se odvija u zrnima koja imaju najpovoljniju orijentaciju za to, odnosno koja su povoljno orijentirana u odnosu na pravac naprezanja. Porastom naprezanja, linije klizanja započinju zahvaćati i ostala zrna koja nemaju toliko pogodnu orijentaciju. U polikristalu zone otežane deformacije su prepreke koje zaustavljaju gibanje dislokacije i granice zrna koje služe kao dodatna prepreka. Što je zrno sitnije, granice zrna imaju veću duljinu, a deformacija je više otežana. [3]

2.5. Plastično tečenje materijala

U području plastične deformacije ne postoji linearna veza između naprezanja i deformacije, kao što je objašnjeno u poglavlju 2.4. Iz tog je razloga potrebno uspostaviti određene kriterije čijim zadovoljavanjem započinje prijelaz iz elastičnog u plastično područje i zadržavanje u istom. Kada smična naprezanja na kliznim ravninama i pravcima dosegnu kritičnu vrijednost, odnosno kada je ostvareno određeno naprezanje u materijalu, on počinje plastično teći. Naprezanje je tenzorska veličina i uvjet za određivanje njegove kritične vrijednosti ovisi o shemi napregnutog stanja. Normalno vlačno ili tlačno naprezanje, potrebno da u deformirajućem materijalu nastanu trajne plastične deformacije, naziva se naprezanje plastičnog tečenja i u literaturi se označava s k_f . U općem slučaju smatra se da je ovo naprezanje jednako granici popuštanja $R_p=R_{p0,2}$ kod jednoosnog stanja naprezanja (konvencionalna granica razvlačenja). Poveznica između maksimalnog smičnog naprezanja (τ_{max}) i naprezanja plastičnog tečenja (k_f) za jednoosno napregnuto stanje definira se kao:

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

Jednadžba (5) govori da će plastična deformacija materijala nastupiti kada smično naprezanje dosegne polovicu naprezanja plastičnog tečenja. [2]

2.5.1. *Uvjet plastičnog tečenja*

Prethodno je objašnjen slučaj jednoosno napregnutog stanja, ali kod realnih procesa deformiranja najčešće se radi o višeosno napregnutom stanju. Kod takvih slučajeva naprezanja početak plastičnog tečenja ovisi o kombinaciji naprezanja u svim osima. U današnjoj suvremenoj mehanici najčešće se koriste uvjeti plastičnog tečenja koji omogućuju određivanje ekvivalentnog naprezanja u obliku skalara za neko troosno napregnuto stanje, a to su: [2], [11]

- Trescin uvjet plastičnog tečenja materijala - po ovoj teoriji do plastične deformacije dolazi u slučaju kada vrijednost najvećeg smičnog naprezanja τ_{\max} , u uvjetima složenog napregnutog stanja dosegne vrijednost τ_{\max} kod koje dolazi do trajne deformacije u jednoosno napregnutom stanju.
- Von Misesov uvjet plastičnog tečenja materijala - naziva se još i teorija najveće distorzijske energije. Do plastične deformacije, prema ovoj teoriji, dolazi kada je energija plastične deformacije, akumulirana pri promjeni oblika u uvjetima složenog troosnog napregnutog stanja, jednaka količini energije koja vrši trajnu promjenu oblika kod jednoosnog opterećenja.

2.6. Utjecaj trenja

U procesima oblikovanja deformiranjem trenje se definira na dodirnim površinama alata i deformiranog proizvoda. Ono ima utjecaj na energetske uvjete deformacije, izbor tehnologije proizvodnje, postojanost alata i na samu kvalitetu proizvoda. Zbog navedenih utjecaja trenju se pridodaje velika pozornost i pokušava se smanjiti na najmanju moguću mjeru korištenjem različitih maziva. [3]

Teorija trenja ima više pristupa: [3]

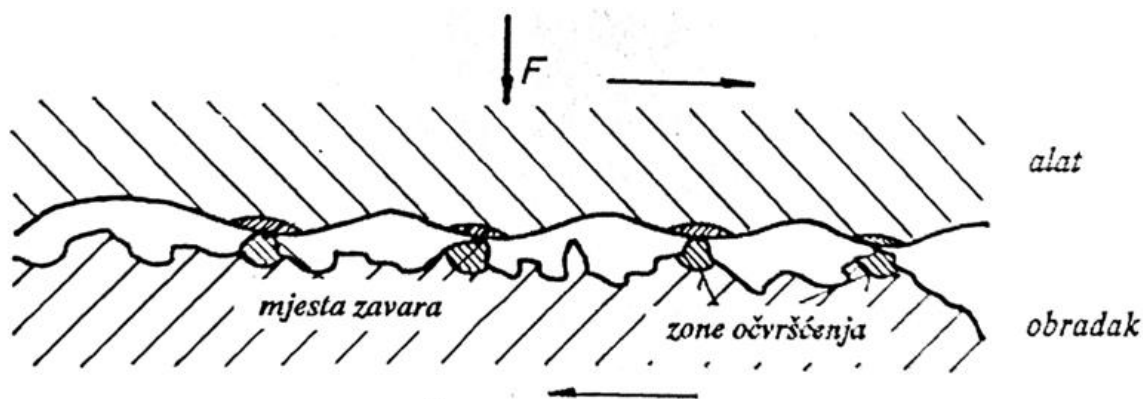
1. geometrijski pristup (tumači trenje kao posljedicu mikrohrapavosti)
2. molekularni pristup (tumači trenje kao posljedicu djelovanja molekularnog privlačenja te se zasniva na molekularno-kinematičkim predodžbama)
3. deformacijski pristup (tumači trenja kao posljedicu otpora metala neravninama)
4. kombinirani pristup (tumači trenje kao skup povezanih pravaca razvoja trenja).

Danas se koristi kombinirani pristup koji tumači trenje kao funkciju mikroneravnina i međumolekularnog privlačenja (adhezija). [2]

2.6.1. Teorija trenja

Navedeno je da se kontaktno trenje javlja između alata i proizvoda u tijeku procesa oblikovanja deformiranjem. Trenje se javlja zbog hrapavosti kontaktnih površina dvaju tijela u dodiru. Kod njihovog međusobnog gibanja čestice jednog tijela koje ulaze u neravnine drugog i dolazi do zaljepljivanja potpuno čistih površina materijala. [3]

Za potrebe objašnjavanja prirode trenja koristi se Bowden-Tabor model trenja [Slika 8].



Slika 8. Model trenja prema Bowden-Taboru [2]

Model objašnjava da prilikom dodira dva tijela, u ovom slučaju dodir alata i obradka koji se deformira, nastaju mali zavari. Dodiri između dviju ploha su prisutni samo na nekim ispupčenim mjestima. Navedeni zavari nastaju zbog velikih specifičnih pritisaka koji su rezultat velikih sila korištenih u procesima oblikovanja deformiranjem. Stoga, da bi se omogućilo tečenje materijala, mora postojati gibanje tj. zavari se moraju raskinuti. Zaključuje se da je sila trenja sila koje će prouzročiti raskidanje zavara tj. sila trenja mora biti jednaka sumi svih smičnih sila koje su potrebne za prekidanje mjesta kontakta. Ovaj model vrijedi za čiste metalne površine, a na dodirnim površinama alata i proizvoda u standardnim postupcima oblikovanja deformiranjem nalazi se neki sloj nečistoća, oksida i često puta maziva. [2]

Uzevši to u obzir, prema K.H. Kloos-u, djelujući faktor trenja rangira se na: [2]

- suho trenje (trenje bez sloja koji bi razdijelio površine u dodiru, faktor trenja je $\mu = 0,3$ ili veći)
- granično trenje (trenje kod kojeg postoji vrlo tanki granični sloj maziva ili nekog nemetalnog materijala koji razdjeljuje dvije površine, faktora trenja se kreće do vrijednosti $\mu = 0,1$)
- mješovito trenje (trenje kod kojeg postoji sloj maziva pa odlomljena čestica nastala raskidanjem zavara nema mogućnost ponovo doći u dodir s površinom alata i obratka, faktora trenja je vrijednosti do $\mu = 0,03$)
- hidrodinamsko trenje (kod kojeg površine ne dolaze u dodir zbog sloja maziva između njih, faktor trenja je $\mu = 0,01$ ili manji).

Kod postupaka plastične deformacije kod kojih prevladavaju vlačna naprezanja i gdje su tlačna naprezanja manja od naprezanja plastičnog tečenja, što je slučaj kod postupka dubokog vučenja, za određivanje veličine sile trenja možemo koristiti Coulombov zakon trenja u izvornom obliku: [2]

$$F_{tr} = \mu N, \quad (6)$$

gdje je:

F_{tr}	N	sila trenja
μ		faktor trenja
N	N	normalna sila na dodirnu površinu.

2.6.2. Tehnološka maziva

Trenje se kao fizikalni proces u postupcima oblikovanja deformiranjem ne može izbjeći, ali se može smanjiti na zadovoljenu vrijednost korištenjem maziva. Vrlo je bitno da metalna površina nije čista već da ima granični sloj koji predstavlja nosioca maziva i adhezijski sloj. Kako bi mazivo obavilo svoju zadaću i doprinijelo uspješnom proizvodnom procesu ono mora ispuniti svoje zadaće. Glavni zadatak maziva je da smanji broj lokalnih zavara tj. da se stvori monomolekularni sloj prevlake koja onemogućava direktan kontakt između alata i obratka. [2]

Primjena tehnoloških maziva važna je kako bi se smanjilo kontaktno trenje i habanje, odvela toplina, snizio otpor deformaciji i rad deformacije te dobile čistije površine gotovog proizvoda. Tehnološka maziva moraju imati temperaturnu postojanost i potrebnu sposobnost tečenja. Isto tako poželjno bi bilo da se maziva mogu brzo nanijeti na materijal te nakon provedbe postupka lagano odstraniti s gotovog proizvoda. Maziva ne smiju štetiti čovjeku te ne smiju izazvati koroziju gotovog proizvoda i samog alata. [3]

Postoje osnovne grupe maziva: [3]

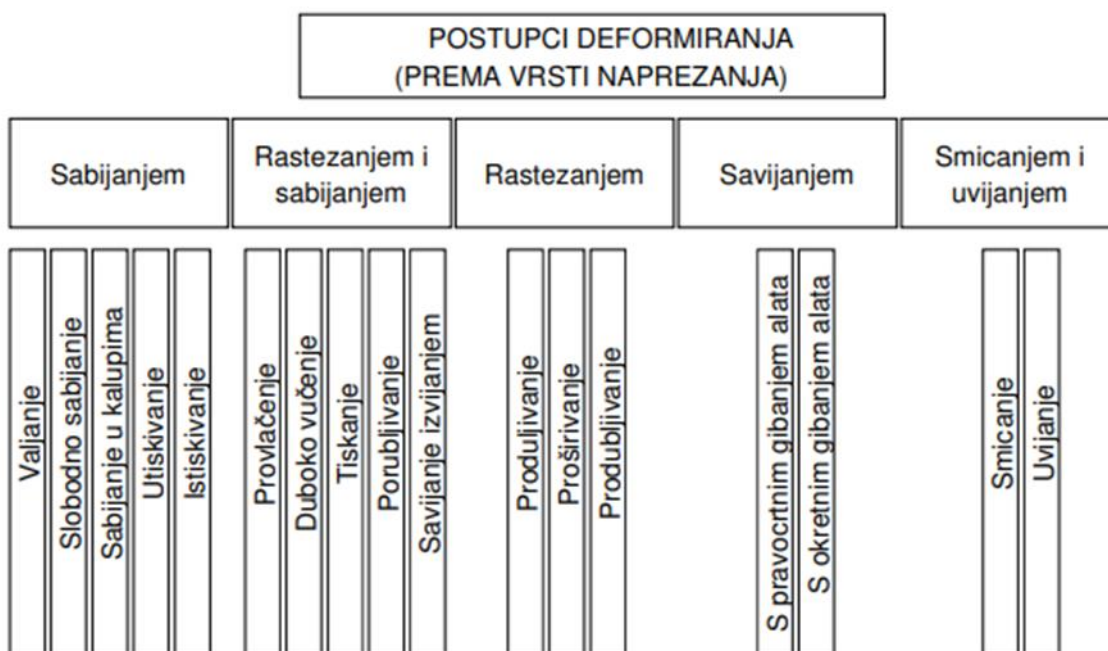
- tekuće emulzije
- masti i smjese biljnih i mineralnih ulja
- konzistentna maziva
- prozirno-staklasta maziva
- praškasta maziva
- metalna maziva.

2.7. Podjela postupaka oblikovanja deformiranjem

Podjela postupaka oblikovanja deformiranjem može se provesti na temelju niže navedenih kriterija: [11]

- vrste naprezanja
- temperature
- sredstva kojim se vrši deformiranje
- oblika sirovca.

Prema vrsti djelujućeg naprezanja razlikuju se postupci sabijanja, rastezanja i sabijanja, rastezanja, savijanja, smicanja i uvijanja [Slika 9].



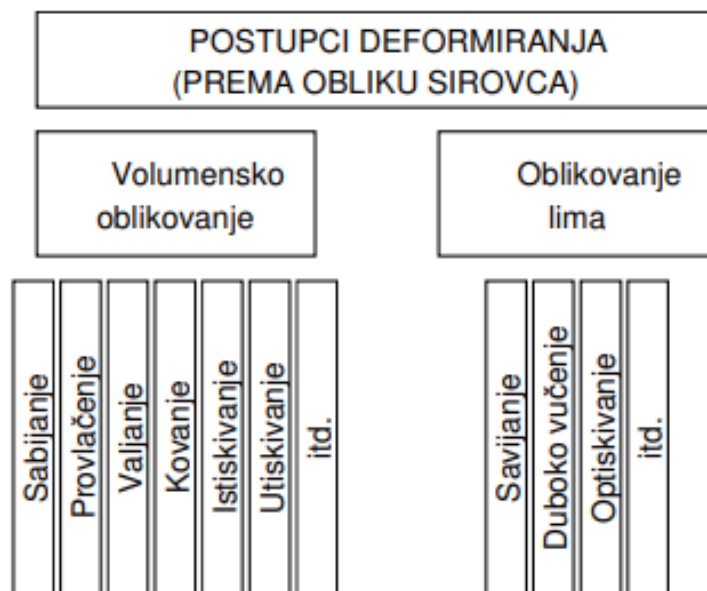
Slika 9. Podjela postupaka deformiranja prema vrsti naprezanja [11]

S obzirom na temperaturu pri kojoj se proces deformiranja obavlja razlikujemo tople i hladne postupke oblikovanja deformiranjem. Hladna deformacija nastupa kada se postupak deformiranja odvija pri temperaturi nižoj od $0,3 T_t$, gdje je T_t temperatura tališta deformiranog materijala. [2]

Izravnim dodirnom materijala i alata tj. mehaničkim putem, obavlja se većina postupaka oblikovanja deformiranjem, a željena deformacija se može ostvariti djelovanjem različitih medija ili energije u svrhu alata. Kao primjeri medija mogu se koristiti kruti materijali, kapljevine ili plinovi koji uzrokuju statičku ili dinamičku silu na materijal, a primjeri

korištenja energije su postupci deformiranja eksplozijom, magnetskim tokom ili elektromagnetskim poljem. [11]

S obzirom na oblik sirovca razlikuju se postupci volumenskog oblikovanja i postupci oblikovanja lima [Slika 10].



Slika 10. Postupci oblikovanja s obzirom na oblik sirovca [11]

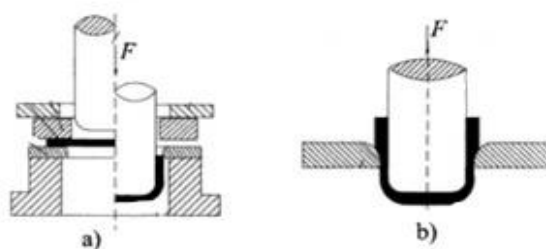
Željena geometrija se kod postupaka oblikovanja deformiranjem često dobiva kroz nekoliko uzastopnih faza (operacija) koje se mogu obavljati na jednom slijednom višefaznom alatu montiranom na jednom stroju ili na više alata montiranih na više strojeva. Faze moraju biti pomno osmišljene i analizirane kako bi se dobio što bolji rezultat, tj. obradak. [11]

3. DUBOKO VUČENJE

Vrlo važno mjesto u serijskoj proizvodnji zauzima postupak dubokog vučenja. Duboko vučenje je postupak obrade deformiranjem kojim se izrađuju različite posude, kutije, limeni radijatori, automobilske karoserije i slično. Ovim postupkom se prerađuje lim te proizvodi limena roba debljine limova od 0,02 mm pa do 50 mm. Najčešće se koristi lim debljine oko 1 mm što spada u tankostijene materijale. Tanki limovi se oblikuju pri sobnoj temperaturi, u hladnom stanju, jer prilikom povišene temperature postoji opasnost od stvaranja obgora. Limovi s debljinama većim od 10 mm redovito se podvrgavaju deformaciji u toplom stanju jer je potrebna sila za deformaciju manja zbog čvrstoće materijala koja se povećanjem temperature smanjuje. [2]

Postupak dubokog vučenja možemo podijeliti na dva tipa s obzirom na ponašanje debljine lima tijekom samog procesa, a to su: [12]

1. duboko vučenje bez promjene debljine lima [Slika 11a]
2. duboko vučenje sa stanjenjem debljine lima [Slika 11b].

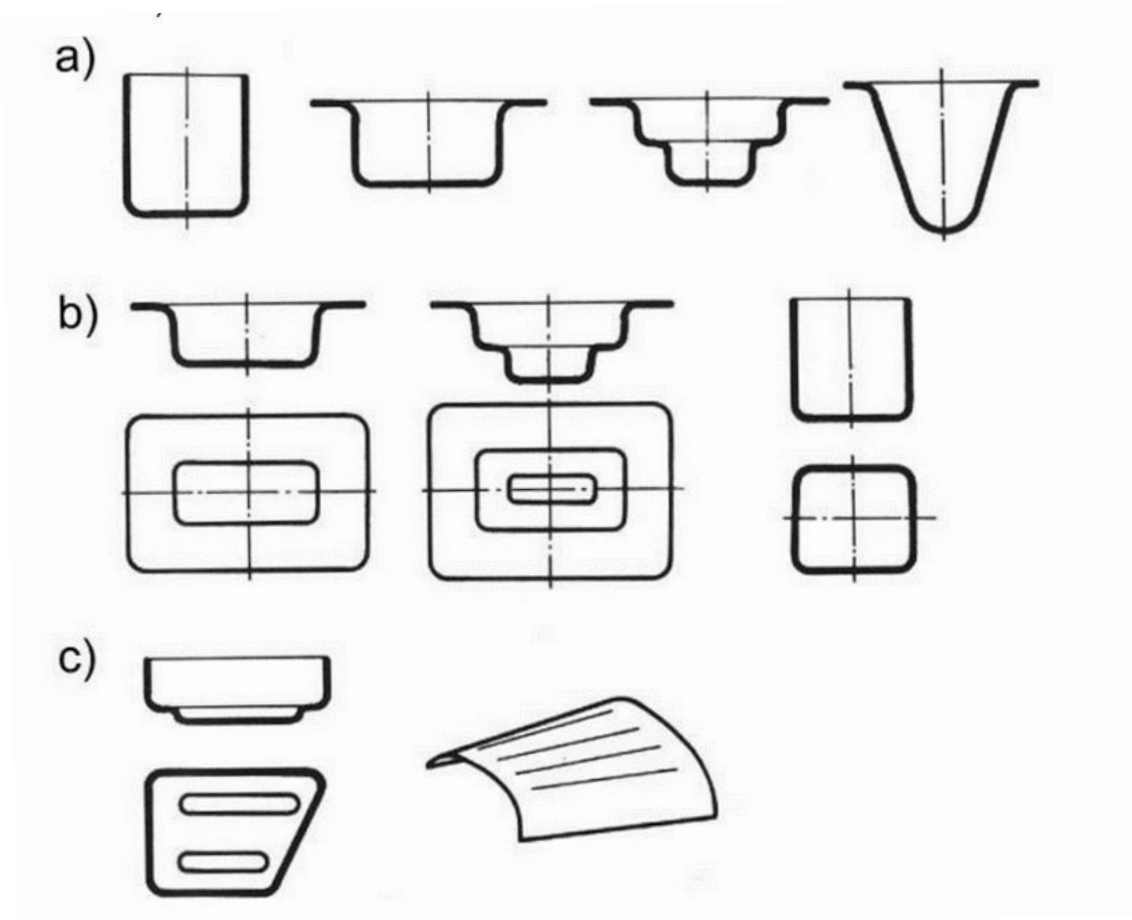


Slika 11. Dva tipa dubokog vučenja [13]

Na slici [Slika 11] je uočljivo kako je alat za duboko vučenje bez promjene debljine lima sastavljen od puno više dijelova u odnosu na drugi alat o čemu će više biti riječ u sljedećim poglavljima. Općenito se koristi postupak dubokog vučenja bez promjene debljine lima i on će biti tema ovog rada.

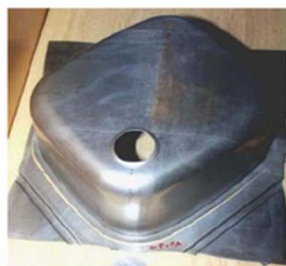
Postupke dubokog vučenja moguće je podijeliti prema geometriji gotovog komada na: [12]

1. čisto duboko vučenje (šuplji dio s ravnim dnom i rotacijsko simetričan dio) [Slika 12 a]
2. duboko vučenje dijelova pravilnog geometrijskog oblika (kutijasti dijelovi) [Slika 12b]
3. duboko vučenje dijelova nepravilne geometrije (npr. blatobrani, karoserije automobila itd.) [Slika 12c].



Slika 12. Osnovni oblici dijelova koji se proizvode postupkom dubokog vučenja [12]

Paralelno s razvojem automobilske i avionske industrije odvijao se razvoj dubokog vučenja. Širok asortiman proizvoda koji je prije spomenut nalazi se u svakodnevnom životu, a najviše su zastupljeni u automobilskoj industriji, avioindustriji, brodogradnji, poljoprivrednoj i procesnoj tehnici, industriji kućanskih aparata i posuđa itd. U nastavku su prikazani proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja [Slika 13, Slika 14, Slika 15, Slika 16]. [4]



Slika 13. Kutijasti proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja [12]



Slika 14. Proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja: Automobilaska karoserija [14]



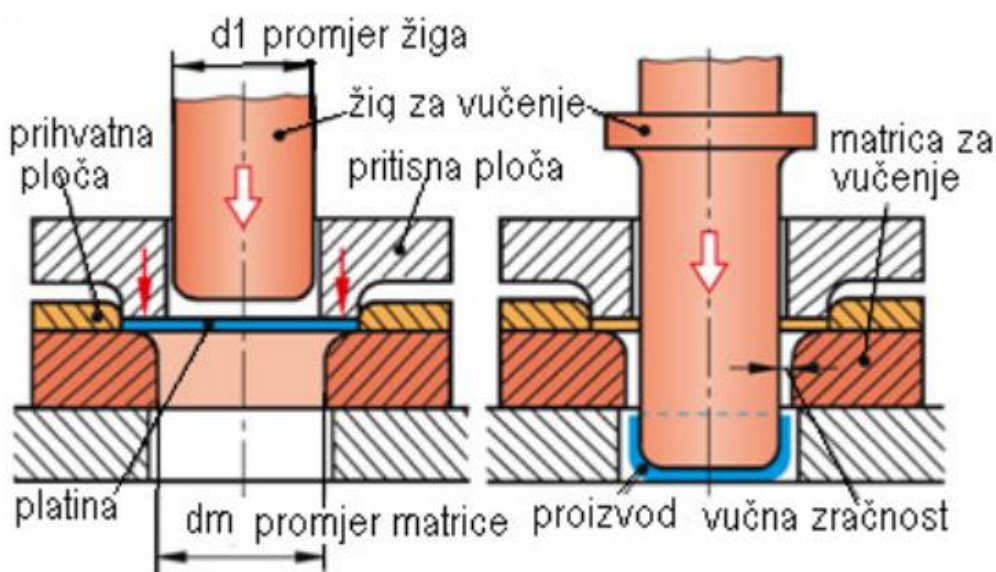
Slika 15. Proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja: Posude [15]



Slika 16. Proizvodi dobiveni postupkom dubokog vučenja: Čahura metka [16]

3.1. Postupak dubokog vučenja

Duboko vučenje je proces koji se vrlo rijetko provodi u jednoj fazi, stoga se proizvod izrađuje u više faza uz korištenje više alata. Na slici [Slika 17] je prikazan tijek procesa dubokog vučenja, a sam alat za duboko vučenje posuda jednostavnog cilindričnog oblika sastoji se od žiga i matrice za vučenje, prihvatne i pritisne ploče koja se još u literaturi naziva tlačni prsten, te možebitnih izbacivača koji služi za skidanje proizvoda sa žiga. Početni oblik materijala za obradu je ravna ploča lima koja može imati kružni, eliptični, kvadratni ili drugačiji oblik, a naziva se platina. Ako je platina okruglog oblika naziva se rondela. [6], [17]



Slika 17. Proces dubokog vučenja [6]

Postupak vučenja se provodi na sljedeći način: [6]

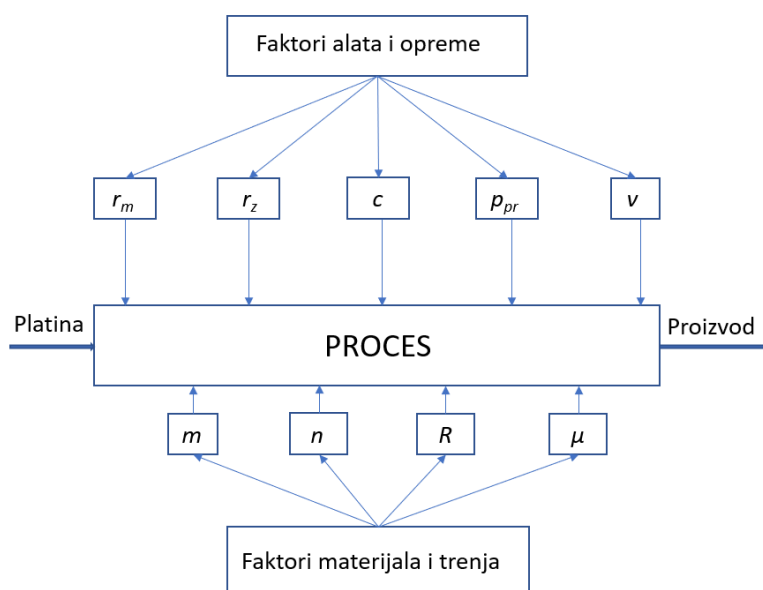
1. Platina se uloži u prihvatnu ploču te stegne pritisnom pločom po rubu matrice da bi se izbjeglo gužvanje materijala i osiguralo ravnomjerno klizanje.
2. Nakon prihvata platine, žig se spušta i tlačnim djelovanjem preoblikuje platinu preko zaobljenog ruba matrice u šuplje tijelo. Također, tlačna sila žiga ne smije biti prevelika jer dolazi do pucanja materijala i probijanja dna posude.

Za složenije oblike obradka, alat se izvodi u više ili manje zatvorenih i složenijih konstrukcija, katkad s više žigova i izbacivača, a postupak se odvija u više faza dubokog vučenja. Dakle sam postupak vučenja je utiskivanje žiga preše u platinu i tečenje materijala platine preko ruba matrice tako da poprima oblik žiga. [2], [18]

Za procesu dubokog vučenja postoji velik broj varijabli koje utječu na sam proces oblikovanja, a mogu se klasificirati na: [13]

- faktore materijala i trenja
- faktore alata i opreme.

Važna svojstva materijala su koeficijent očvršćenja i izotropija koja povezuje stanjenost i istežanje lima, dok trenje i podmazivanje imaju velik utjecaj na uspješnost procesa dubokog vučenja. Shematski prikaz faktora koji utječu na proces dubokog vučenja prikazan je na slici [Slika 18]. [13]



Slika 18. Shematski prikaz faktora u procesu dubokog vučenja [13]

Na shemi su prisute oznake:

- r_m - radijus matrice
- r_z - radijus žiga
- c - zračnost između žiga i matrice
- p_{pr} - pritisak tlačnog prstena
- v - brzina žiga
- m - maksimalni koeficijent redukcije
- n - koeficijent očvršćenja
- R - normalna izotropija koja povezuje stanjenje i istežanje lima
- μ - koeficijent trenja.

Bez obzira na velik broj faktora koji utječu na sam proces oblikovanja, najvažniji od njih je istezljivost. Navedeni je koeficijent trenja kao faktor koji utječe na proces pa valja naglasiti da se pod smanjenjem trenja misli na uvođenje maziva, ali i na završnu obradu alata. Isto tako, veličina i oblik platine utječu na proces oblikovanja dubokim vučenjem tako što u slučaju većih dimenzija ili komplicirane geometrije platine dolazi do poteškoća u tečenju materijala. Brzina žiga u zadovoljavajućim iznosima omogućava lako tečenje materijala, dok pretjerana brzina dovodi do grešaka na gotovom proizvodu. Radijusi zaobljenja matrice i žiga moraju biti u propisanim veličinama u protivnom dolazi do grešaka na proizvodu. [19]

3.2. Materijali za duboko vučenje

Na temelju objašnjenog postupka dubokog vučenja vidljivo je da materijal koji se podvrgava navedenom procesu mora biti istezljiv. Lim mora biti deklariran s istezljivošću od najmanje 35 %. Općenito velika istezljivost materijala rezultira smanjenom čvrstoćom, odnosno velika čvrstoća daje malu istezljivost. Dakle, materijali velike istezljivosti imaju malu čvrstoću ($R_m < 300 \text{ N/mm}^2$) i sadržaj ugljika im ne prelazi 0,1 %. Mala čvrstoća materijala nije problem jer nakon završetka procesa dubokog vučenja, budući da se radi o hladnoj deformaciji, dolazi do očvršćenja tj. iskustvo je pokazalo da se vlačna čvrstoća proizvoda poveća približno 2,5 puta u odnosu na lim s početka procesa. Prilikom dubokog vučenja u više faza istezljivost se smanjuje, gdje nakon 3-4 faze padne na samo 5 %. Dakle, ako ima više faza potrebno je obaviti međufazno meko žarenje kojim se vrata prvobitna svojstva materijala. Lim koji se koristi u procesu dubokog vučenja mora biti i kemijski obrađen tj. dekapiran. Ovim postupkom na površini lima stvara se sloj fosfida koji sprječava kontakt čistih metalnih površina materijala i alata te predstavlja nosioca maziva. [2]

Dubokim vučenjem proizvodi se velik asortiman proizvoda od kojih valja spomenuti kuhinjsko posuđe, sudopere i kade. Materijali koji se koristi za navedene proizvode su Cr-Ni čelici. Istezljivost ovih čelika pri sobnim temperaturama je velika te iznosi oko 50 %. Poliranjem površine lima ovih čelika stvara se kromov oksid koji djeluje kao zaštitni sloj i sprječava koroziju. Osim čelika, često se postupku dubokog vučenja podvrgavaju i bakrene legure. Najpoznatija legura bakra za postupak dubokog vučenja je mjed. Mjed s 32 % cinka ima istezljivost do 65 %. [5]

U nastavku su još navedeni neki komercijalni nazivi materijala koji se primjenjuju u procesu dubokog vučenja. Primjer takvog materijala je Inocel i Haynes koji su legure na bazi nikla, samo što Haynes sadrži veću koncentraciju molibdena i volframa. Obje legure nude veliku

korozijsku postojanost, dobru istezljivost te veliku otpornost na visoke temperature. Haynes se često koristi u zrakoplovnoj industriji. [20]

U procesu dubokog vučenja primjenjuje se i titan, metal niske gustoće kojeg karakterizira visoka čvrstoća i otpornost na koroziju. Legure titana koriste se u medicinskoj, arhitektonskoj te zrakoplovnoj industriji. Ne tako rijetko u procesu dubokog vučenja koristi se i aluminij. Ovaj materijal ima dobru istezljivost te je otporan na koroziju. [20]

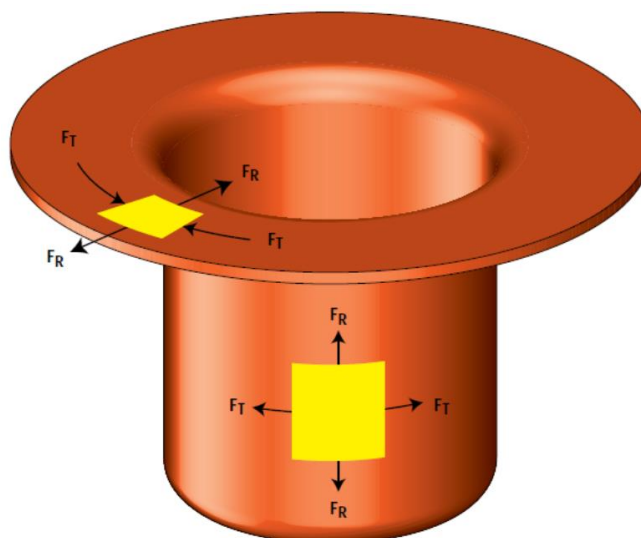
Navedena svojstva daju mu mnoge prednosti koje ga razlikuju od drugih metala. Aluminij je održiv i može se reciklirati te čini samo trećinu mase čelika. Aluminijski dijelovi nastali postupkom dubokog vučenja postaju sve popularniji među proizvođačima i kupcima zbog širokog raspona primjene, visoke otpornosti na udarce i hrđu te povoljnog omjera čvrstoće i mase. Zbog tih svojstava popularan je izbor za primjenu u zrakoplovnoj, automobilskoj i medicinskoj industriji. [21]

Dakle, najčešći materijali koji se mogu duboko vući su:

- niskouglični čelik s $R_m < 300 \text{ N/mm}^2$, istezljivošću do 35 %
- mjed s do 32 % Zn
- Cr-Ni čelici
- aluminij.

3.3. Naprezanja i proračun

Pretpostavlja se da debljina lima u procesu vučenja ostaje konstantna, a postupak se promatra kao dvoosno deformacijsko stanje. U stvarnosti dolazi do zadebljanja lima pri rubu posude i stanjenja pri dnu. Na sljedećoj shemi napregnutog stanja [Slika 19] prikazano je kako na platini djeluju tlačno-vlačne sile, a u plaštu vlačne sile. [2]



Slika 19. Shema napreznja u stijenci posude koja se podvrgava dubokom vučenju [4]

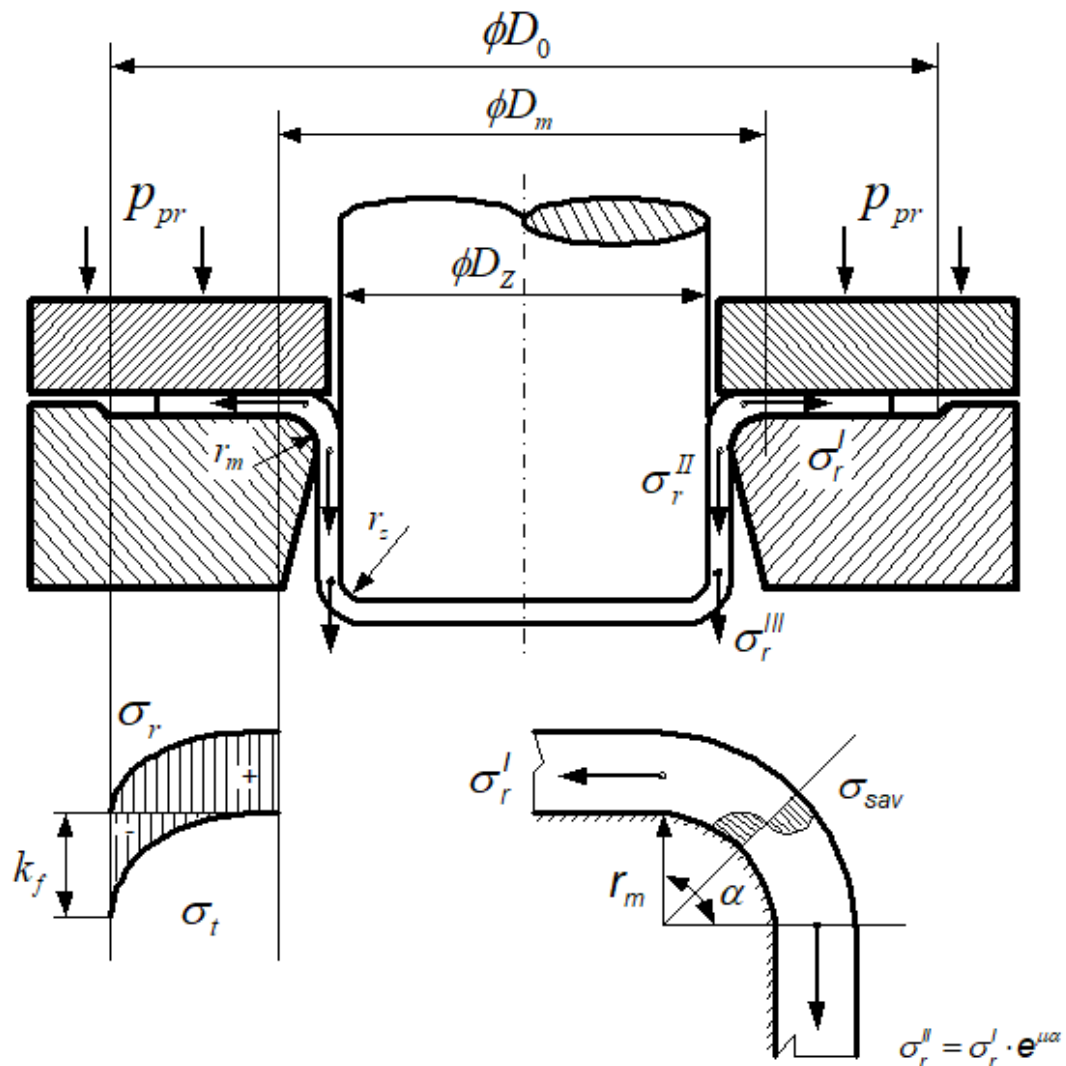
Proces deformiranja odvija se pod utjecajem vlačnog napreznja koje djeluje u radijalnom smjeru (σ_r) i tlačnog napreznja koje djeluje u tangencijalnom smjeru (σ_t). Dno posude ne trpi nikakvu deformaciju, a aksijalnog napreznja nema. Uvjet plastičnog tečenja za ravninski napregnuto stanje glasi: [2]

$$\sigma_r + \sigma_t = k_f, \quad (7)$$

gdje je:

k_f	N/mm^2	napreznje plastičnog tečenja
σ_r	N/mm^2	radijalno napreznje
σ_t	N/mm^2	tangencijalno napreznje.

Na slici [Slika 20] prikazana je raspodjela napreznja kod procesa dubokog vučenja.



Slika 20. Naprezanja lima kod procesa dubokog vučenja [4]

Na slici [Slika 20] je vidljivo da trenje djeluje kada tlačni prsten pritišće rondelu, a postoji i znatan utjecaj trenja prilikom prelaska materijala preko radijusa zaobljenja ruba matrice gdje se i naprezanje povećava za faktor $e^{\mu\alpha}$, pri čemu μ označava faktor trenja, a α kut matrice. Zračnost (c) na alatu između matrice i žiga je vrlo mala (oko 10 % do 30 % debljine stijenke lima) pa lim mora imati uske tolerancije. Zračnost mora biti mala kako bi se postigao odgovarajući oblik vučenog izratka te izbjegle pojave nabiranja lima. [2]

3.3.1. Pritisak tlačnog prstena

Duboko vučenje se može obavljati i bez tlačnog prstena ako lim koji se podvrgava postupku oblikovanja ima dovoljnu debljinu i dobro podnosi tlačna naprezanja u cilju da se ne stvaraju nabori. Prema Siebelu specifični pritisak tlačnog prstena za prvu fazu dubokog vučenja računa se prema jednadžbi (8). [2]

$$p_{pr} = 25 \cdot 10^{-4} \cdot R_m \cdot \left[\left(\frac{D_0}{D_1} - 1 \right)^3 + \frac{D_1}{200s} \right] \quad (8)$$

Gdje je:

p_{pr}	N/mm ²	pritisak tlačnog prstena
D_0	mm	početni promjer ronđele
D_1	mm	promjer posude nakon prve faze
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća materijala
s	mm	debljina lima.

Iz navedenog izraza može se dobiti sila tlačnog prstena tako što se pritisak tlačnog prstena pomnoži, prema jednadžbi (9), s površinom na koju djeluje. Vidi sliku naprezanja [Slika 20]. [2]

$$F_{pr} = \frac{D_0^2 - D_m^2}{4} \cdot \pi \cdot p_{pr} \quad (9)$$

Gdje je:

F_{pr}	N	sila tlačnog prstena
D_m	mm	promjer matrice.

Upotrebom tlačnog prstena u postupku dubokog vučenja osigurava se da ne nastaju greške. Više o tome u poglavlju 3.7. Valja naglasiti da pritisak tlačnog prstena ne smije biti premali jer dolazi do stvaranja nabora, ali ne smije biti ni prevelik jer može doći do pucanja lima. [2]

3.3.2. Ukupno naprezanje

Izraz za radijalno naprezanje uslijed plastične deformacije (σ_r) računa se prema jednadžbi (10). [2]

$$\sigma_r = k_{fm} \cdot \ln \frac{D_0}{D_m} \quad (10)$$

Gdje je:

k_{fm}	N/mm ²	srednje naprezanje plastičnog tečenja
D_0	mm	početni promjer rondela
D_m	mm	promjer matrice.

Većinom se oblikuju tanki limovi pa je kod procesa dubokog vučenja prisutan tlačni prsten iz razloga navedenih u poglavlju 3.3.1. Pri računanju ukupnog naprezanja u obzir se mora uzeti i sila tlačnog prstena ako je prsten prisutan u procesu. Zaključno, ukupno naprezanje se povećava ako se rondela drži silom tlačnog prstena uz matricu pa se naprezanje uslijed plastične deformacije povećava za iznos djelovanja tlačnog prstena. To pokazuje izraz za naprezanje uslijed plastične deformacije i djelovanja sile tlačnog prstena, jednadžba (11). [2]

$$\sigma_r' = k_{fm} \cdot \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu \cdot F_{pr}}{D_m \cdot \pi \cdot s} \quad (11)$$

Gdje je:

σ_r'	N/mm ²	naprezanje uslijed plastične deformacije i djelovanja tlačnog prstena
μ		faktor trenja
F_{pr}	N	sila tlačnog prstena
s	mm	debljina lima.

Kako je prikazano na slici [Slika 20], prelaskom naprezanja preko radijusa zaobljenja ruba matrice ono se povećava za faktor $e^{\mu\alpha}$. Budući da se u izraz uzima faktor trenja valja naglasiti kako trenje u dubokom vučenju ima velik utjecaj na ukupno naprezanje, stoga ga je potrebno dobro proučiti (vidjeti poglavlje 3.6). Kut matrice za posude iznosi 90° odnosno u radijanima $\pi/2$. Iz toga slijedi izraz za naprezanje uslijed prijelaza preko radijusa zaobljenja (σ_r''): [2]

$$\sigma_r'' = \sigma_r' \cdot e^{\mu\alpha}, \quad (12)$$

gdje je:

α	rad	kut matrice.
----------	-----	--------------

Na slici [Slika 20] se vidi i naprezanje uslijed savijanja koje je potrebno uzeti u obzir prilikom određivanja ukupnog naprezanja. Naprezanje uslijed savijanja opisuje izraz (13). [2]

$$\sigma_{sav} = k_{fm} \cdot \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \quad (13)$$

Gdje je:

σ_{sav} N/mm² naprezanje uslijed savijanja
 r_m mm radijus zaobljenja matrice.

Iz jednadžbe (13) se vidi da zaobljenost matrice mora biti povoljno zaobljena kako bi se smanjilo naprezanje uslijed savijanja, a time i ukupno naprezanje. Dakle, kada se na iznos naprezanja uslijed prijelaza preko radijusa zaobljenja (σ_r'') doda naprezanje uslijed savijanja (σ_{sav}) dobivamo izraz za ukupno naprezanje (σ_{uk}) u realnom slučaju (14). [2]

$$\sigma_{uk} = \left(k_{fm} \cdot \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu \cdot F_{pr}}{D_m \cdot \pi \cdot s} \right) \cdot e^{\mu\alpha} + k_{fm} \cdot \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \quad (14)$$

Sila dubokog vučenja se definira kao: [2]

$$F = D_z \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_{uk}, \quad (15)$$

gdje je:

D_z mm promjer žiga.

3.4. Stupanj deformacije

Osim navedenog logaritamskog stupnja deformacije u poglavlju 2.2 u procesu dubokog vučenja moguće je stupanj deformacije izražavati i drugim veličinama.

Pojam stupnja redukcije obuhvaća račun na osnovi površine trapezoida koji prelazi u relativno uski i dugački pravokutnik na plaštu posude. Formula za izračunavanje dana je u jednadžbi (16). [2]

$$\psi = \frac{D_0 - D_z}{D_0 + D_z} \quad (16)$$

Gdje je:

ψ stupanj redukcije
 D_z mm promjer žiga
 D_0 mm početni promjer rondele.

Kao rezultat dobivamo bezdimenzijsku veličinu, ali ju definiramo u postocima. [2]

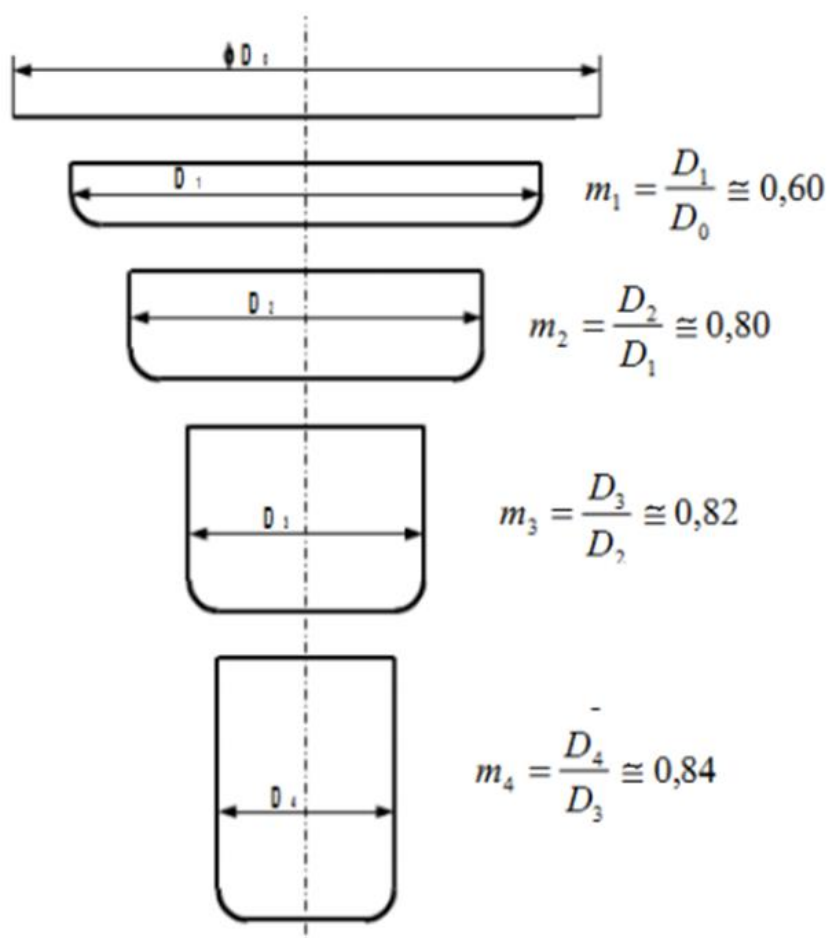
Često korištena veličina za definiranje stupnja deformacije je i koeficijent redukcije (m). Koeficijent redukcije predstavlja omjer ulaznog i izlaznog promjera posude, odnosno rondele ako se radi u prvoj fazi. Izraz je prikazan jednažbom (17). [2]

$$m_1 = \frac{D_1}{D_0} \quad (17)$$

Gdje je:

- m_1 koeficijent redukcije prve faze
- D_1 mm promjer posude nakon prve faze
- D_0 mm početni promjer rondele.

Na temelju izračunatih koeficijenata redukcije može se definirati potreban broj faza dubokog vučenja. Cilj je postići optimizirani proces s maksimalnim stupnjem deformacije u pojedinoj fazi. Slika [Slika 21] prikazuje faze dubokog vučenja te pripadajuće koeficijente maksimalne redukcije. [2]



Slika 21. Faze dubokog vučenja i maksimalne redukcije presjeka rondele [17]

Maksimalni koeficijenti redukcije rastu kako se približavamo posljednjoj fazi dubokog vučenja gdje dobivamo gotov proizvod. Taj proces je razumljiv jer se radi o hladnoj deformaciji gdje se istezljivost materijala smanjuje s brojem faza dubokog vučenja. Na slici [Slika 22] je prikazana proizvodnja limenke soka za piće u više faza, od ronđele do gotovog proizvoda. [2]



Slika 22. Proizvodnja limenke u više faza [17]

3.5. Strojevi i alati za duboko vučenje

Za operacije dubokog vučenja koriste se preše koje mogu imati hidraulički i mehanički pogon. Kod hidrauličke preše postoji mogućnost preciznijeg podešavanja parametara, dok je produktivnost na strani mehaničkih preša. Odabir preše istovremeno je povezan s konstrukcijom alata, odnosno izvedba alata ovisi o preši koja je na raspolaganju. [12]

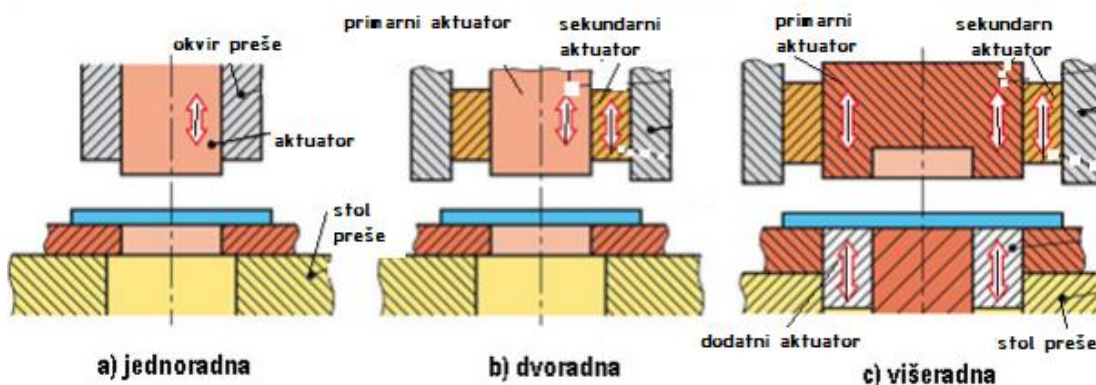
3.5.1. Preše za duboko vučenje

Odabir preše za duboko vučenje bazira se na osnovi najvažnijih tehnoloških karakteristika procesa: [12]

- parametara procesa (deformacijska sila i rad)
- dimenzije alata i duljine radnog hoda
- brzine deformiranja
- veličine proizvodne serije.

Podjela preše za rad s alatima [Slika 23] može se obaviti prema načinu rada tj. gibanju koje preša prenosi na alat: [6]

1. jednoradne preše koje imaju samo jedan aktuator koji se može pomicati gore-dolje
2. dvoradne preše koje imaju dva aktuatora, primarni i sekundarni, s međusobno neovisnim gibanjem
3. višeradne preše koje izvode više gibanja istovremeno ili postupno.

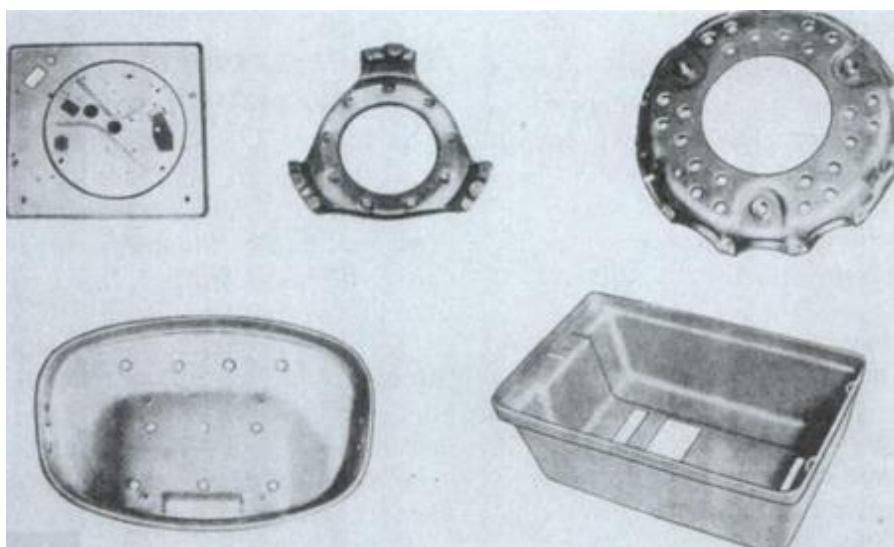


Slika 23. Podjela preša prema načinu rada [6]

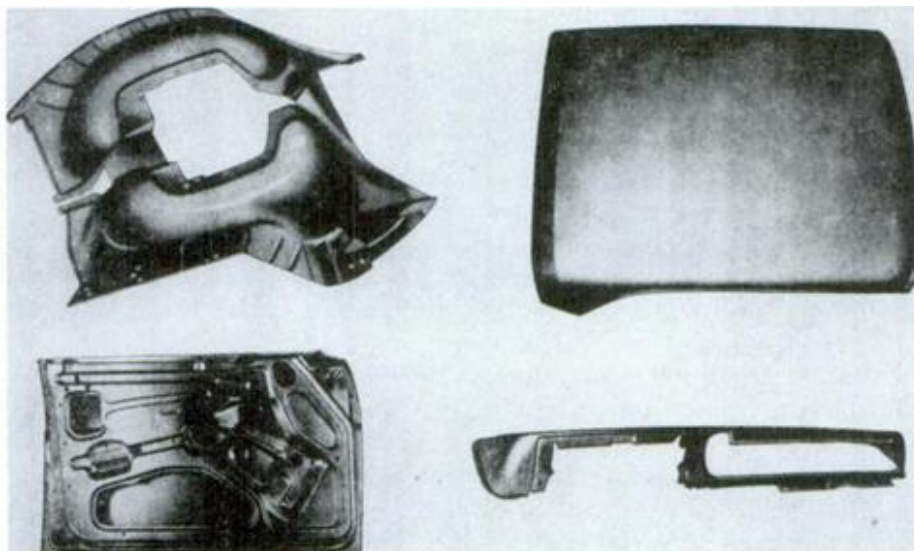
Preše se mogu podijeliti s obzirom na broj radnih pozicija na: [12]

- jednopozicijske
- višepozicijske.

Jednopozicijske preše u svom radnom prostoru imaju samo jedan alat, dok je kod višepozicijskih moguće postaviti više alata u radni prostor. Prikazani su tipični proizvodi nastali na jednoradnoj preši [Slika 24] i dvoradnoj preši [Slika 25].

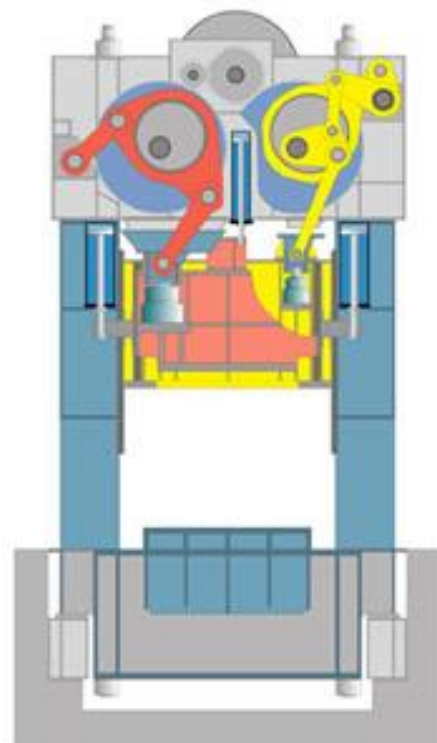


Slika 24. Tipični proizvodi nastali na jednoradnoj preši [22]



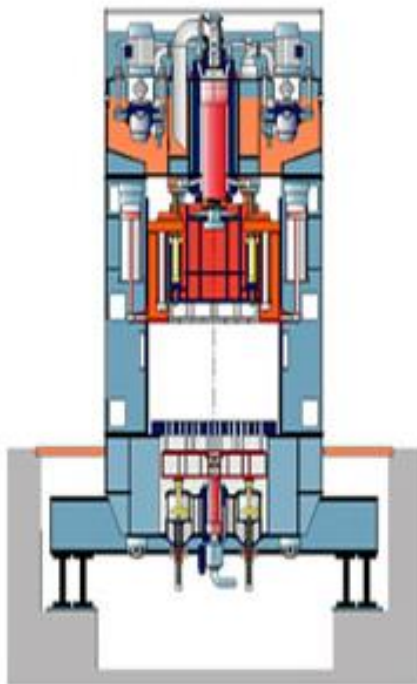
Slika 25. Tipični proizvodi nastali na dvoradnoj preši [22]

Za proces dubokog vučenja koriste se preše s mehaničkim pogonom i preše s hidrauličkim pogonom. U slučaju mehaničke preše [Slika 26] sustav zglobova drži tlačni prsten, a sam postupak vučenja izvodi više pogona. Tlačni prsten i žig su pokretani jednim vratilom te samim time ta dva sustava rade u geometrijskom odnosu jedan prema drugome. [23]



Slika 26. Mehanička preša za duboko vučenje [23]

Hidraulična preša je vrsta stroja za oblikovanje metala koji koristi tekućinu kao radni medij. Radi na principu Pascalovog zakona koji kaže da se intenzitet pritiska u statičkom fluidu jednako prenosi u svim smjerovima. Osnovno načelo rada preše je prijenos hidrauličkog ulja uz pomoć pumpe u cilindar gdje se stvara visoki tlak. Cilindar se pomiče uz pomoć ulja pod visokim tlakom u određenom smjeru. Za zadovoljenje zahtjeva brzine kretanja aktuatora odabire se jedna ili više različitih pumpi za ulje. Glavni dio hidrauličke preše sastoji se od tijela preše, cilindra za žig, cilindra za izbacivanje i uređaja za punjenje. Pogonski mehanizam sastoji se od spremnika za ulje, visokotlačne pumpe, niskotlačnog regulacijskog sustava, motora, različitih tlačnih i prijenosnih ventila. Specifikacija hidraulične preše općenito se izražava radnom silom (kN) ili nazivnom masom (t). Hidraulička preša [Slika 27] je ekonomična i ima široku primjenu. [24], [25]



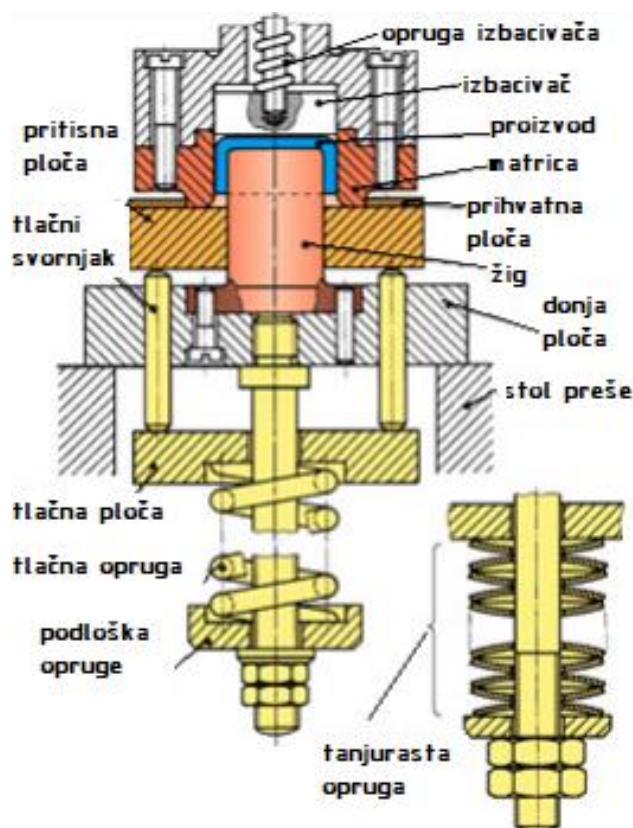
Slika 27. Hidraulička preša za duboko vučenje [23]

Izbor preše s obzirom na pogon određuje se na temelju zahtjeva proizvodnje, ekonomičnosti proizvodnje i svestranosti proizvodnog pogona. Dakle izbor se mora bazirati na tipu posla koji treba izvesti na preši. Brzina preše može se podešavati na obje preše, ali valja naglasiti kako na brzinu proizvodnje prvenstveno utječe tip materijala koji se obrađuje. Za proces dubokog vučenja pri kojem je hod alata do 102 mm preporučena je mehanička preša iz razloga brže proizvodnosti. Za vučenje pri kojem je hod alata iznad 102 mm, izbor preše se bazira na zahtjevima ekonomičnosti i proizvodnosti. [22]

3.5.2. Alat za duboko vučenje

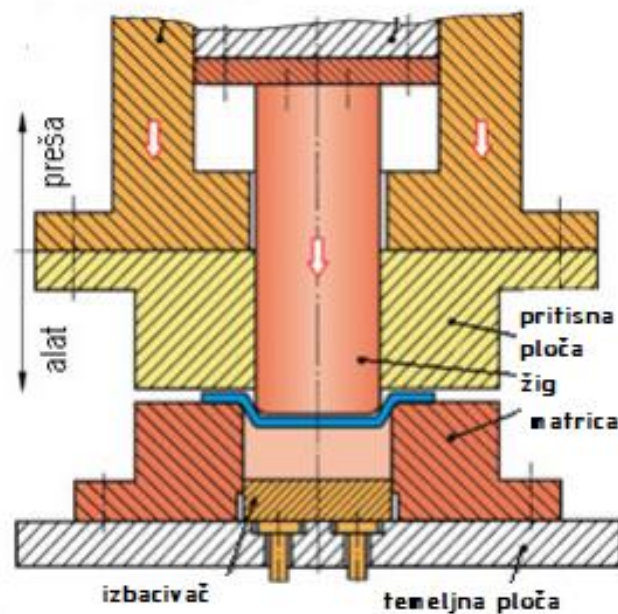
Ranije je spomenuto da izvedba alata za duboko vučenje ovisi o odabranoj preši, stoga postoji alat za rad na jednoradnoj preši i alat za rad na višeradnoj preši.

Kod alata za rad na jednoradnoj preši sila kojom se pridržava lim za vrijeme vučenja ostvaruje se opružnim sklopom na pritisknoj ploči kao što je prikazano na slici [Slika 28]. Potrebno je obratiti pažnju da s povećanjem dubine vučenja raste sila opruge što može prouzročiti pucanje materijala, stoga je potrebno odgovarajuće podesiti silu opruge. Matrica za vučenje, koja ima opružni izbacivač izratka, postavljena je na aktuator preše, dok je na stolu preše žig za vučenje s opružnom pritisknom pločom i opružnim sklopom unutar stola preše. [6]



Slika 28. Alat za duboko vučenje na jednoradnoj preši [6]

Na slici [Slika 29] prikazan je alat za rad na višeradnoj preši kod kojeg je na sekundarni aktuator postavljena pritiskna ploča za pridržavanje lima, dok je žig za vučenje postavljen na primarni aktuator. Matrica s izbacivačem izradaka je postavljena na radni stol preše. Kod dvoradne preše izbacivač se pokreće oprugom, a sila žiga i pritiskne ploče mogu se nezavisno podešavati. [6]



Slika 29. Alat za duboko vučenje na višeradnoj preši [6]

3.6. Trenje i podmazivanje u procesu dubokog vučenja

Tijekom procesa dubokog vučenja postoje različiti uvjeti podmazivanja tj. postoje različite vrste trenja. Hidrodinamsko trenje je prisutno u području tlačnog prstena, a granično trenje u području radijusa žiga i matrice. Faktor trenja u procesu dubokog vučenja je vrlo promijenljiv, a poprima vrijednosti između $\mu = 0,1$ i $\mu = 0,3$. Podmazivanje u postupku dubokog vučenja je važno iz razloga što snižava silu vučenja, povećava tečenje, smanjuje trošenje alata i greške na radnim komadima. Odabir maziva radi se na temelju tipa operacije dubokog vučenja te tipu materijala koji se podvrgava postupku oblikovanja deformiranjem. [2], [13]

Tri vrste maziva koja se koriste u procesu duboko vučenja su: [26]

1. ulja
2. emulzije (vodene otopine lubrikanata)
3. maziva (sadrže ulja i krute tvari, najčešće korištena u procesu dubokog vučenja).

Dane su preporuke o vrsti maziva s obzirom na tip materijala [Tablica 1].

Tablica 1. Korištena maziva u procesu dubokog vučenja za različiti tip materijala [13]

Materijal	Mazivo
Nisko ugljični čelik	mineralno ulje, otopina sapuna, masno ulje i mineralno ulje, lanolin, mast ulja u emulziji na bazi sapuna, sapun i vosak
Cr- Ni čelici	kukuruzno ili ricinusovo ulje i emulgirani sapun, vosčani ili nauljeni papir, čvrsti voštani film, grafitna suspenzija u prahu osušena na radnom komadu prije početka rada, litopon i kuhano laneno ulje,
Bakrene legure	emulzija masnog ulja i sapuna, masno i mineralno ulje, svinjska mast (25-50 %) u mineralnom ulju, pravilno nanijeti osušeni sapun
Aluminij	mineralno ulje, loj i parafin, sumporeno ulje po mogućnosti obogaćeno s 10 % masnog ulja, osušeni sapun ili vosak
Titan	klorirani parafin, sapun, vosak, polimeri

Mazivo se može upotrijebiti kao pasta ili kao tekućina razrijeđena s vodom. Način primjene ovisi o potrebnoj koncentraciji maziva i ozbiljnosti postupka. Postoji mnogo metoda za nanošenje maziva na lim, ali najčešće su: [26]

1. ručno nanošenje maziva pomoću krpe
2. prevlačenjem lima pomoću valjaka
3. nanošenje maziva na alat i lim u postupku operacije gdje se višak tekućeg maziva odvodi u sustav za filtriranje i recirkulaciju.

Dobro odabrano mazivo koje je na propisan način nanijeto povećat će proizvodnost, a smanjiti stopu grešaka na proizvodima. Većina maziva utječe na temperaturu alata, odnosno maziva smanjuju temperaturu alata što je poželjno kako ne bi došlo do oštećenja ili gubitka svojstava materijala alata. Isto tako, temperatura koja se razvija uslijed trenja između alata i obratka može dovesti do razgradnje maziva i smanjiti mu svojstva podmazivanja. Valja

naglasiti da prije nanošenja maziva treba površinu metala očistiti kako bi se riješili svih nepotrebnih tvari koje mogu smanjiti utjecaj podmazivanja. [27]

Uklanjanje maziva s oblikovanog proizvoda nakon operacije dubokog vučenja važno je jer svako mazivo koje ostane iza njega može ometati sljedeće korake u proizvodnji. Mineralna ulja, životinjska mast i biljna ulja mogu se ukloniti organskim otapalom, emulgiranjem, saponifikacijom ili vodenim alkalnim sredstvom za čišćenje. Mast se također može ukloniti s lima organskim otapalom ili alkalnim sredstvom za čišćenje. Krutine se zbog svoje teže topivosti teže uklanjaju pa zahtijevaju upotrebu dodatnih metoda čišćenja. Naftna ulja zahtijevaju upotrebu alkalnih sredstava. Ako se proizvodi odmah čiste biljna ulja se mogu ukloniti vrućom vodom ili alkalnim sredstvom ako su proizvodi ostavljeni određeno vrijeme. [26]

Maziva je potrebno pravilno nanijeti i nakon upotrebe pravilno zbrinuti. Ovo je važno kako bi se sačuvalo zdravlje radnika u proizvodnji, ali i svih ljudi na Zemlji čije zdravlje dolazi u pitanje ako se maziva propisno ne zbrinu nakon upotrebe. Troškovi podmazivanja i naknadnog zbrinjavanja maziva mogu biti dosta veliki, stoga je potrebno pažljivo birati vrstu maziva i metode podmazivanja kako bi troškovi cjelokupne proizvodnje bili prihvatljivi. [27]

3.7. Greške u postupku dubokog vučenja

Kao kod svakog postupka tako i kod izvođenja dubokog vučenja moguća je pojava različitih grešaka. Postoje mnogi razlozi nastajanja grešaka, a najčešći su: nekvalitetan materijal za obradu, problemi s alatom (oštećenja i pogrešno konstruiranje), razne nepravilnosti u radu itd. Greške rezultiraju neispravnim i nepravilnim proizvodom te ih je potrebno uočiti i spriječiti njihovo daljnje nastajanje. [2]

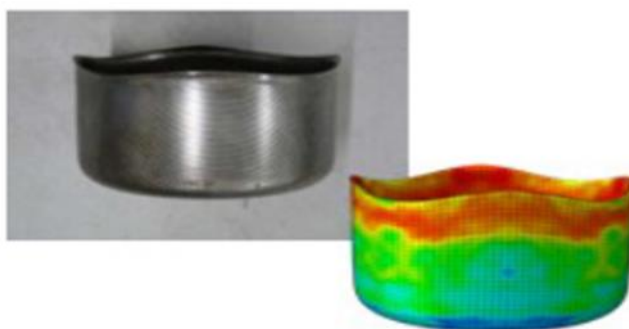
U praksi se najčešće javljaju sljedeće greške:

1. Stvaranje nabora na rubovima posude [Slika 30] – do greške dolazi zbog premale sile tlačnog prstena ili prevelikog radijusa zakrivljenja žiga i matrice. [13]
2. Nejednolika visina posude [Slika 31] – do greške dolazi zbog posljedice anizotropije lima koji se podvrgava postupku, u smjeru valjanja istežljivost je veća pa se na izratku stvaraju tipične uške. [2], [28]
3. Raspucavanje ruba posude – do greške dolazi zbog ekscentriciteta žiga i matrice, nejednolike debljine lima, nedovoljnog podmazivanja, istrošenog ruba matrice i žiga ili prevelike zračnosti. [2], [6]

4. Pucanje lima na dnu posude [Slika 32] – do greške dolazi zbog velikog odnosa vučenja, prevelike sile tlačnog prstena, malog radijusa na žigu i matrici te visoke brzine vučenja. [2], [6]



Slika 30. Stvaranje nabora na rubovima posude podvrgnute postupku dubokog vučenja [12]



Slika 31. Nejednaka visina posude te stvaranje uške [28]



Slika 32. Pucanje lima na dnu posude [12]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu proveden je postupak prve faze dubokog vučenja za izradu simetričnog cilindričnog proizvoda iz čeličnog lima te je provedena analitička analiza tog postupka. Iz navedene analize dobiva se maksimalna sila vučenja koja se uspoređuje s eksperimentalno mjerenim rezultatima iste sile.

4.1. Postupak prve faze dubokog vučenja

Proveden je postupak prve faze dubokog vučenja simetrične posude kako bi se pomoću softvera izmjerila sila vučenje u različitim koracima procesa. Postupak dubokog vučenja proveden je u Laboratoriju za oblikovanje deformiranjem na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, te je za potrebe eksperimenta korištena dvoradna hidraulička preša nazivne sile 400 kN [Slika 33]. Preša sadrži glavni radni cilindar koji postiže maksimalnu silu od 400 kN te donji protusmjerni radni cilindar koji postiže maksimalnu silu od 100 kN.



Slika 33. Hidraulička preša za duboko vučenje

Na slici [Slika 34] je prikazan alat navedene hidrauličke preše koji se sastoji od matrice, žiga te tlačnog prstena. Na glavnom radnom cilindru se nalazi matrica dok se na stolu preše nalazi žig. Tlačni prsten se pokreće pomoću donjeg protusmjernog radnog cilindra.



Slika 34. Alat hidrauličke preše za duboko vučenje

U tablici [Tablica 2] prikazane su dimenzije alata za duboko vučenje hidrauličke preše.

Tablica 2. Dimenzije alata za duboko vučenje

Oznaka	Mjerna jedinica	Iznos	Naziv
D_m	mm	162	promjer matrice
r_m	mm	6	radijus zaobljenja matrice
α	rad	$\pi/2$	kut matrice
D_z	mm	150	promjer žiga

Za izradu simetričnog proizvod postupkom dubokog vučenja korištena je platina okruglog oblika koja se još naziva i rondela [Slika 35].



Slika 35. Rondela za eksperimentalni postupak dubokog vučenja

Materijal rondela je čelični lima, a njeni tehnički podaci potrebni za analitičku analizu dani su u tablici [Tablica 3].

Tablica 3. Tehnički podaci rondela

Rondela	Materijal	Promjer D_0 , mm	Debljina s , mm
	St 34	250	1,25

Eksperimentalno je proveden postupak prve faze dubokog vučenja korištenjem navedenog alata na hidrauličkoj preši i prikazane rondela. Rondela se stavlja na postolje hidrauličke preše gdje se tlačnim prstenom pritisne uz matricu. Budući se matrica nalazi na glavnom radnom cilindru, ona se spušta prema dolje kako bi žig počeo preoblikovati rondelu preko zaobljenog ruba matrice. Tijekom provedbe postupka dubokog vučenja rađeno je obilato podmazivanje s ciljem smanjenje trenja između alata i obratka. Za postupak podmazivanja korišteno je polusintetičko motorno ulje Total Quartz 7000 Energy 10W-40. Postupkom dubokog vučenja rondela se preoblikuje u simetričnu cilindričnu posudu promjera jednakog promjeru žiga [Slika 36].



Slika 36. Proizvod nakon prve faze dubokog vučenja

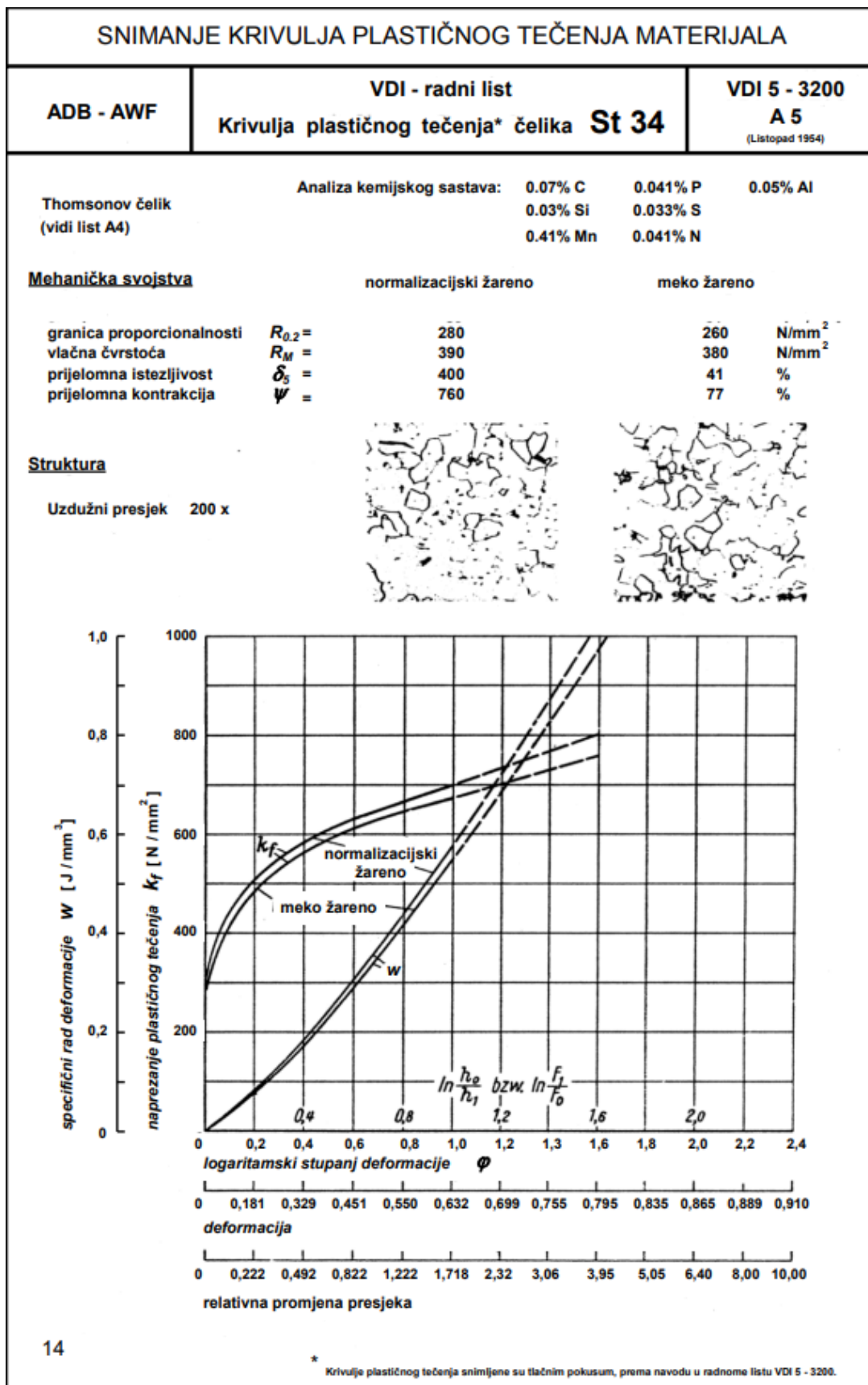
Tijekom procesa dubokog vučenja mjerit će se sile na radnom i protusmjernom cilindru u 8 koraka. Visina gotovog proizvoda, samim time i hod alata, je 80 mm. Dakle, svakih 10 mm će se mjeriti navedene sile. Postupak mjerenja, a i sam postupak dubokog vučenja, ponovljen je tri puta. Uzeta je aritmetička sredina od tri mjerenja u svakom koraku kao mjerodavan rezultat promatranih sila. Da bi se matrica na glavnom radnom cilindru počela gibati prema žigu koji je kruto vezan za postolje, ona mora savladati silu tlačnog prstena koji pomoću protusmjernog cilindra drži rondelu priljubljenu uz matricu za vrijeme procesa. Stoga, da bi se dobila stvarna sila djelovanja na žigu, odnosno sila dubokog vučenja, potrebno je mjerenu silu u gornjem cilindru smanjiti za silu mjerenu na donjem protusmjernom cilindru.

4.2. Analitička analiza

S obzirom na poglavlje 3.3, napravljena je analitička analiza sile dubokog vučenja te je izračunana potrebna sila tlačnog prstena. Potrebni podaci oko geometrije alata i obradka za provođenje proračuna dani su u prethodnom poglavlju 4.1.

Kako je objašnjeno u poglavlju 3.6, faktor trenja u procesu dubokog vučenja se kreće između vrijednosti $\mu = 0,1$ i $\mu = 0,3$ te je promjenjiv tijekom procesa. Za potrebe proračuna uzet će se vrijednost faktora trenja od $\mu = 0,15$.

Podaci u vezi materijala ronđele iščitani su iz interno dostupne dokumentacije [Slika 37].



Slika 37. Snimljena krivulja plastičnog tečenja i tehnički podaci materijala St 34 [29]

Budući da je rondela napravljena od čeličnog lima, točan materijal je oznake St 34 normalizacijski žaren, iz dokumenta [Slika 37] je iščitana vrijednost vlačne čvrstoće (R_m) u iznosu od 390 N/mm^2 . Za potrebe određivanja srednjeg naprezanje plastičnog tečenja (k_{fm}) određen je logaritamski stupanj deformacije na početku i na kraju postupka prema jednadžbi (1). Razumljivo je da logaritamski stupanj deformacije na početku procesa je jednak nuli ($\varphi_0 = 0$), dok se na kraju prve faze računa prema jednadžbi (1) kao:

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0}{D_1} = \ln \frac{250}{150} = 0,51.$$

Na temelju dobivenih logaritamskih stupnjeva deformacije iz grafa za naprezanje plastičnog tečenja i logaritamskog stupnja deformacije [Slika 37], iščita se vrijednost naprezanja za dobivene vrijednosti stupnja deformacije.

$$\varphi_0 = 0 = R_{p0,2} \rightarrow 280 \frac{N}{mm^2}$$
$$\varphi_1 = 0,51 \rightarrow 610 \frac{N}{mm^2}$$

Prosjeak tih dviju vrijednosti naprezanje plastičnog tečenja je srednje naprezanje plastičnog tečenja (k_{fm}).

$$k_{fm} = \varphi_0 + \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{2} = 280 + \frac{610 - 280}{2} = 445 \frac{N}{mm^2}$$

4.3. Rezultati

4.3.1. Rezultati analitičke analize

Specifični pritisak tlačnog prstena za prvu fazu dubokog vučenja računa se prema jednadžbi (8).

$$\begin{aligned}
 p_{\text{pr}} &= 25 \cdot 10^{-4} \cdot R_m \cdot \left[\left(\frac{D_0}{D_1} - 1 \right)^3 + \frac{D_1}{200s} \right] = \\
 &= 25 \cdot 10^{-4} \cdot 390 \cdot \left[\left(\frac{250}{150} - 1 \right)^3 + \frac{150}{200 \cdot 1,25} \right] = \\
 &= 0,8738 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}
 \end{aligned}$$

Iz toga slijedi da je sila tlačnog prstena, prema jednadžbi (9), jednaka:

$$F_{\text{pr}} = \frac{D_0^2 - D_m^2}{4} \cdot \pi \cdot p = \frac{250^2 - 162^2}{4} \cdot \pi \cdot 0,8738 = 24881,8 \text{ N}$$

Valja naglasiti da je izračunana sila minimalna sila koja je potrebna da tlačni prsten pritisne rondelu kako ne bi došlo do stvaranja grešaka na gotovom proizvodu.

Kako bi se izračunala sila dubokog vučenja (F) iz jednadžbe (15), potrebno je izračunati ukupno naprezanje (σ_{uk1}) po jednadžbi (14).

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{uk1}} &= \left(k_{\text{fm}} \cdot \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu \cdot F_{\text{pr}}}{D_m \cdot \pi \cdot s} \right) \cdot e^{\mu\alpha} + k_{\text{fm}} \cdot \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \\
 &= \left(445 \cdot \ln \frac{250}{162} + \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 24881,8}{162 \cdot \pi \cdot 1,25} \right) \cdot e^{0,15 \frac{\pi}{2}} + 445 \cdot \frac{1,25}{2 \cdot 6 + 1,25} \\
 &= 301,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}
 \end{aligned}$$

$$F = D_z \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_{\text{uk1}} = 150 \cdot \pi \cdot 1,25 \cdot 301,2 = 177421,4 \text{ N}$$

Dakle kao rezultat provedene analitičke analize dobivena je maksimalna sila dubokog vučenja iznosa $F = 177421,4 \text{ N}$ za izračunanu silu tlačnog prstena od $F_{\text{pr}} = 24881,8 \text{ N}$.

Budući da je izračunana minimalna sila tlačnog prstena rezultirala nekonzistentnim rezultatima u pogledu naboravanja ruba radnog komada, u eksperimentalnom dijelu će ona biti namještena na $F_{\text{pr}} = 30 \text{ kN}$. Uvrštavanjem namještene sile tlačnog prstena u jednadžbu (14) dobiva se ukupno naprezanje (σ_{uk2}).

$$\begin{aligned}\sigma_{uk2} &= \left(k_{fm} \cdot \ln \frac{D_0}{D_m} + \frac{2\mu \cdot F_{pr}}{D_m \cdot \pi \cdot s} \right) \cdot e^{\mu\alpha} + k_{fm} \cdot \frac{s}{2 \cdot r_m + s} \\ &= \left(165 \cdot \ln \frac{250}{162} + \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 30000}{162 \cdot \pi \cdot 1,25} \right) \cdot e^{0,15 \frac{\pi}{2}} + 165 \cdot \frac{1,25}{2 \cdot 6 + 1,25} \\ &= 304,25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\end{aligned}$$

Iz jednadžbe (15) računa se maksimalna sila dubokog vučenja (F) za dobiveno naprezanje (σ_{uk2}).

$$F = D_z \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_{uk2} = 150 \cdot \pi \cdot 1,25 \cdot 304,25 = 179218,05 \text{ N}$$

4.3.2. Rezultati mjerenja sile na preši

Prilikom provođenja postupka prve faze dubokog vučenja mjerene su sile tlačnog prstena (sila protusmjernog cilindra) i sila potrebna za gibanje matrice (sila glavnog cilindra). Sila vučenja se dobiva kao razlika tih dviju sila. Prije početka postupka deformiranja na dvoradnoj preši za duboko vučenje se namješta tlak protusmjernog cilindra, odnosno sila tlačnog prstena. Za potrebe provođenja ovog eksperimenta sila je namještena na 30 kN.

Rezultati prvog mjerenja prikazani su u tablici [Tablica 4].

Tablica 4. Rezultati prvog mjerenja

Korak, mm	Sila tlačnog prstena, kN	Sila matrice, kN	Sila vučenja, kN
10	40,92	139,67	98,75
20	35,83	171,19	135,36
30	32,64	188,18	155,54
40	32,83	187,25	154,42
50	33,89	181,69	147,80
60	35,36	166,71	131,35
70	39,00	145,69	106,69
80	29,08	124,68	95,60

Rezultati drugog mjerenja prikazani su u tablici [Tablica 5].

Tablica 5. Rezultati drugog mjerenja

Korak, mm	Sila tlačnog prstena, kN	Sila matrice, kN	Sila vučenja, kN
10	39,89	135,65	95,76
20	33,44	164,23	130,79
30	28,69	180,61	151,92
40	32,94	197,76	164,82
50	33,72	188,80	155,08
60	34,56	169,95	135,39
70	39,06	149,09	110,03
80	29,66	126,84	97,18

Rezultati trećeg mjerenja prikazani su u tablici [Tablica 6].

Tablica 6. Rezultati trećeg mjerenja

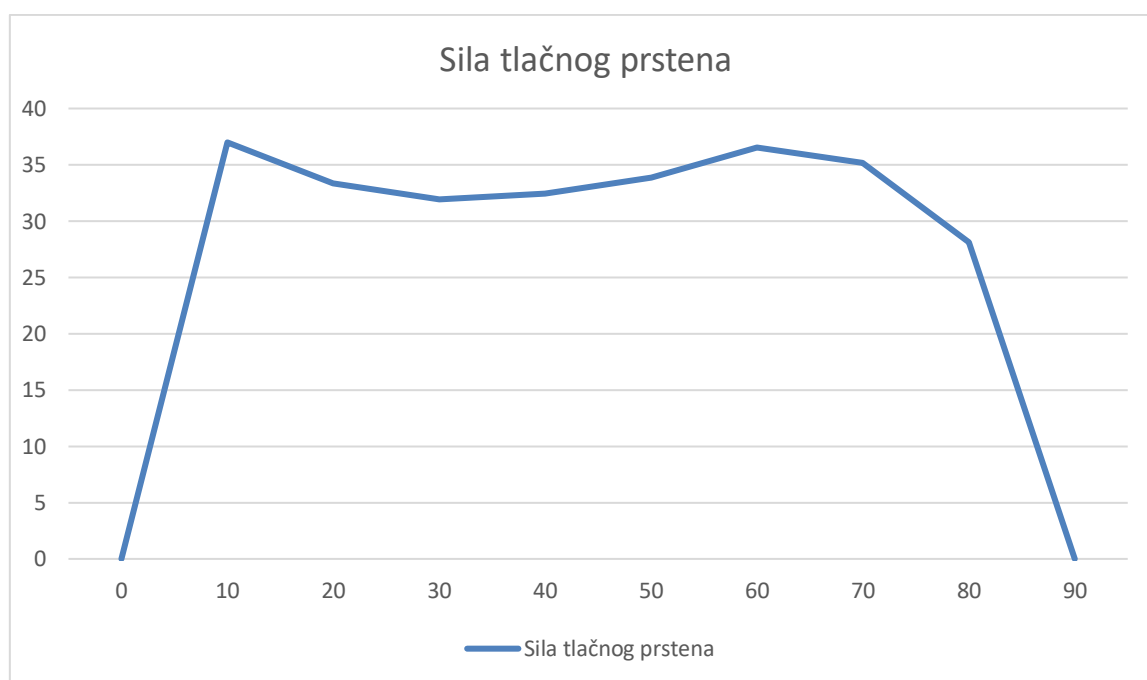
Korak, mm	Sila tlačnog prstena, kN	Sila matrice, kN	Sila vučenja, kN
10	30,16	152,18	122,02
20	30,83	190,81	159,98
30	34,50	197,30	162,80
40	31,50	186,94	155,44
50	34,05	167,94	133,89
60	39,70	150,33	110,63
70	27,52	124,99	97,47
80	26,65	112,35	86,70

Na temelju rezultata dobivenih iz tri ponovljena mjerenja napravljena je tablica s prosječnim vrijednostima radi lakšeg uvida u rezultate te lakše analize i usporedbe [Tablica 7].

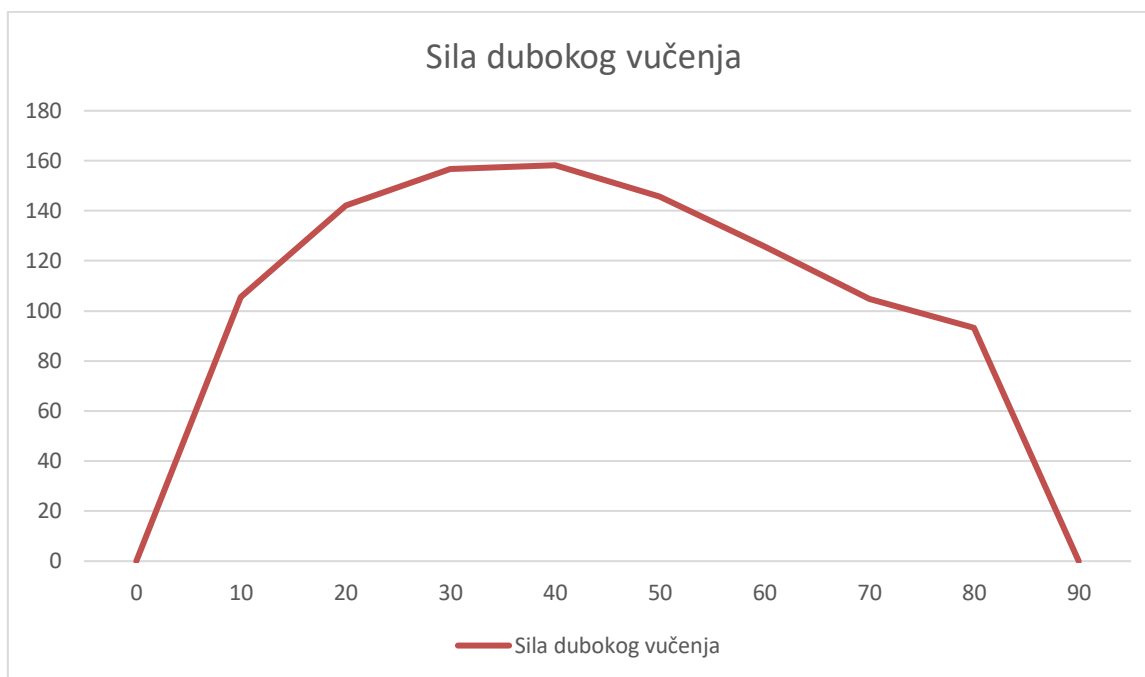
Tablica 7. Prosječni rezultati mjerenja

Korak, mm	Sila tlačnog prstena, kN	Sila matrice, kN	Sila vučenja, kN
10	36,99	142,50	105,51
20	33,37	175,41	142,04
30	31,94	188,70	156,75
40	32,42	190,65	158,23
50	33,89	179,48	145,59
60	36,54	162,33	125,79
70	35,19	139,92	104,73
80	28,13	121,29	93,16

Na temelju dobivenih prosječnih rezultata napravljen je grafički prikaz. Prikazan je dijagram sile tlačnog prstena i hoda alata [Slika 38] te dijagram sile vučenja i hoda alata [Slika 39].



Slika 38. Grafički prikaz prosječne vrijednosti sile tlačnog prstena s obzirom na hod alata



Slika 39. Grafički prikaz prosječne sile dubokog vučenja s obzirom na hod alata

4.4. Analiza rezultata

Iz grafičkog prikaza prosječne vrijednosti sile tlačnog prstena s obzirom na hod alata [Slika 38] vidljivo je da je sila tlačnog prstena u odnosu na hod alata ostala relativno konstantna tijekom cijelog procesa dubokog vučenja. Na početku je vidljiv porast do namještanja sile tlačnog prstena, zatim relativno konstantno držanje sile i na kraju pad sile prilikom izlaska cijele ronđele iz tlačnog prstena.

Iz grafičkog prikaza prosječne sile dubokog vučenja s obzirom na hod alata [Slika 39] uočava se da sila dubokog vučenja ima nagli porast na početku procesa, zatim lagano pada do samog kraja kada počinje brzo padati iz razloga što je sve manja površina ronđele na koju djeluju tlačna tangencijalna naprezanja koja sabijaju ronđelu, zornije je prikazano na slici [Slika 19], a ujedno se i sve manja površina ronđele nalazi ispod tlačnog prstena što rezultira manjim utjecajem trenja.

U tablici [Tablica 8] prikazani su podaci o maksimalnoj sili dubokog vučenja koji su dobiveni analitičkom analizom i eksperimentalnim putem te prosječna vrijednost sile tlačnog prstena u eksperimentalnom dijelu i vrijednost izračunane sile.

Tablica 8. Podaci dobiveni mjerenjem i analitičkom analizom

	Analitička analiza	Eksperiment
Sila tlačnog prstena, kN	24,88	33,65
Sila dubokog vučenja, kN	177,42	158,23

Zbog nekonzistentnih rezultata u pogledu naboravanja ruba posude pri eksperimentalnom dijelu, sila tlačnog prstena namještena je na 30 kN. Ono što se u stvarnosti regulira i namješta je tlak u cilindru preše, a sila se dobiva na način objašnjen u poglavlju 3.5.1. Zbog različitih grešaka preše poput odstupanja regulatora tlaka, vođenja i same izvedbe cilindra preše te zbog trenja dolazi do odstupanja sile od definirane vrijednosti. Iz tog razloga se ista mjeri. Utvrđivanje iznosa sile tlačnog prstena pomaže u dobivanju šire slike procesa dubokog vučenja i dobivanje sile potrebne za navedeni proces.

Iz tablice [Tablica 8] se vidi da je namještena mjerena sila tlačnog prstena je za 26 % veća u odnosu na minimalnu potrebnu silu tlačnog prstena dobivenu analitičkom analizom, a sila dubokog vučenja mjerena u eksperimentu je za 12 % manja u odnosu na silu dubokog vučenja dobivenu analitičkom analizom. Iako se vidi nepoklapanje podataka analitičke analize i eksperimentalnog dijela, ti rezultati nisu zabrinjavajući ni iznenađujući iz razloga što se u analitičkoj analizi procesa dubokog vučenja dosta parametara aproksimira jer je nemoguće precizno odrediti njihove vrijednosti, poput faktora trenja i naprezanja plastičnog tečenja. Ranije u radu je spomenuto da se vrijednosti tih parametara tijekom samog procesa dubokog vučenja u realnim uvjetima mijenjaju s vremenom. Iz navedenog razloga se radi više pokusa kako bi se otkrile njihove vrijednosti u procesu te na taj način odredio mjerodavan prosjek vrijednosti kako bi analitička analiza što zornije prikazala i predvidjela vrijednosti tih parametara u realnim uvjetima postupka dubokog vučenja.

5. ZAKLJUČAK

Tehnologiju oblikovanja deformiranjem karakterizira visoka produktivnost, dimenzijska točnost i visoka kvaliteta površine proizvoda te mogućnost proizvodnje bez gubitka materijala. Teorija oblikovanja deformiranjem ima zadaću pronaći i razraditi metode za proračun naprezanja, deformacijskih sila i deformacijskog rada u postupcima oblikovanja deformiranjem. Poznavanjem sile i rada deformiranja moguće je odrediti radni stroj te pravilno konstruirati i dimenzionirati alat.

Vrlo važno mjesto u serijskoj proizvodnji zauzima postupak dubokog vučenja kojim se prerađuje lim u tankostjene proizvode. Postoji veliki broj faktora koji utječu na sam proces oblikovanja dubokim vučenjem, ali najvažniji od njih je istezljivost. Lim mora biti deklariran s najmanje 35% istezljivosti. Najčešći materijali limova koji se koriste u navedenom postupku su niskougljični čelik, mjed, Cr-Ni čelici i aluminij.

Za operacije dubokog vučenja koriste se preše koje mogu imati hidraulički i mehanički pogon. Izvedba alata za duboko vučenje ovisi o odabranoj preši, stoga postoji alat za rad na jednoradnoj preši i alat za rad na višeradnoj preši. Osnovni dijelovi alata za duboko vučenje su žig, matrica za vučenje i tlačni prsten, a lim koji se podvrgava postupku dubokog vučenja naziva se platina. Postupak vučenja je utiskivanje žiga preše u platinu i tečenje materijala platine preko ruba matrice tako da poprima oblik žiga.

Proces deformiranja odvija se pod utjecajem vlačnog naprezanja koje djeluje u radijalnom smjeru i tlačnog naprezanja koje djeluje u tangencijalnom smjeru. Prelaskom naprezanja preko radijusa zaobljenja ruba matrice ono se povećava za faktor $e^{\mu\alpha}$. Navedeni faktor, a samim time i naprezanje, evidentno se povećava s povećanjem faktora trenja (μ) koji se u procesu dubokog vučenja mijenja. Kako bi se snizilo ukupno naprezanje, trošenje alata i pojava grešaka, u postupku se provodi podmazivanje s ciljem smanjenja faktora trenja. Koriste se ulja, emulzije i ostala različita maziva, a odabir vrste maziva se temelji na tipu operacije dubokog vučenja i vrsti materija koji se podvrgava navedenom postupku oblikovanja deformiranjem.

Usporedbom sila tlačnog prstena i sila dubokog vučenja dobivenih analitičkom analizom i eksperimentalnim mjerenjem utvrdilo se podudaranje reda veličine. Mjerena sila tlačnog prstena je za 26 % veća od analitički dobivene sile tlačnog prstena, a mjerena sila dubokog vučenja je za 12 % manja u odnosu na analitički dobivenu. Rezultati analitičke analize i eksperimentalnog dijela nisu jednaki već se razlikuju za prethodno navedene postotke. Takvi

rezultati su razumljivi i opravdani zbog korištenja aproksimiranih parametara u analitičkoj analizi. Primjenom navedenih parametara teško je dobiti točan iznos sile dubokog vučenja, ali se mogu dobiti okvirne vrijednosti koje mjerodavno opisuju proces dubokog vučenja. Dakle, provedbom analitičke analize mogu se mjerodavno odrediti sila tlačnog prstena i sila dubokog vučenja koje opisuju proces te daju mogućnost točnog određivanja radnog stroja te pravilnog konstruiranja i dimenzioniranja alat za postupak dubokog vučenja.

LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema, 2009.
- [2] Math M.: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015.
- [3] Rešković S., Teorija oblikovanja deformiranjem, Zagreb: Metalurški fakultet; 2014.
- [4] Materijali katedre za oblikovanje deformiranjem, FSB Zagreb; dostupno na https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/on_line_materijali.htm, pristup 20. rujna 2021. godine
- [5] Definicija stupnja deformacije: dostupno na http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/Part_I/BookSM_Part_I/04_Strain/04_Strain_01_Strain.pdf, pristup 20. rujna 2021. godine
- [6] Alati za preoblikovanje: dostupno na <http://ss-ndustrijska-strojarska-zg/multistatic/Alati%20za%20preoblikovanje.pdf>, pristup 25. rujna 2021. godine
- [7] Matković T, Matković P, Slokar Lj. Znanost o metalima: Zbirka riješenih zadataka. Zagreb: Metalurški fakultet; 2010.
- [8] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Čurković L. Materijali 1. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2011.
- [9] Osnove kristalne strukture: dostupno na <http://www.pmf/Osnovekristalnestrukture.pdf>, pristup 26. rujna 2021. godine
- [10] Plastična deformacija zbog gibanja dislokacije: dostupno na <https://www.coursera.org/lecture/materials-science/plastic-deformation-by-dislocation-motion-Fmqdl>, pristup 26. listopada 2021. godine
- [11] Piljek P. Model plitkog gravurnog kovanja [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.
- [12] Plančić, I. Obrada metala deformiranjem, Zenica: Mašinski fakultet, 2011.
- [13] Boljanović B. Sheet Metal Forming Processes and Die Design. New York: Industrial Press; 2004.
- [14] Slika automobilske karoserije: dostupno na <https://avtotachki.com/hr/iz-chego-delayut-kuzova-avtomobilej/>, pristup 1. listopada 2021. godine
- [15] Slika posuđa: dostupno na <https://www.lonciipoklopoci.hr/kako-na-prirodan-nacin-odrzavati-inox-posudje>, pristup 1. listopada 2021. godine

-
- [16] Slika čahura metaka: dostupno na <https://proleksis.lzmk.hr/37163/>, pristup 1. listopada 2021. godine
- [17] Slade, I. Alatni strojevi 1, skripta za 1. tehničku školu Tesla, Zagreb
- [18] Hu J, Marciniak Z, Duncan J. Mechanics of sheet metal forming. Elsevier; 2002.
- [19] Hingole RS. Advances in Metal Forming. Springer; 2014.
- [20] Deep Draw Metals and Materials: dostupno na <https://www.hudson-technologies.com/materials/>, pristup 10. listopada 2021. godine
- [21] The Advantages and Process of Forming Deep-Drawn Aluminum Parts: dostupno na <https://www.hudson-technologies.com/blog/the-advantages-and-process-of-forming-deep-drawn-aluminum-parts/>, pristup 11. listopada 2021. godine
- [22] Lascoe OD. Handbook of Fabrication Processes. ASM International; 1988.
- [23] Deep drawing with presses: dostupno na <https://www.schulergroup.com/technologienprodukte/.html>, pristup 11. listopada 2021. godine
- [24] Bansal RK. A Text Book of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. Firewall Media; 2005.
- [25] Hydraulic press: dostupno na <https://www.tsinfa.com/hydraulic-press-machine>, pristup 12. listopada 2021. godine
- [26] Choosing a lubricant for deep drawing: dostupno na <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/choosing-a-lubricant-for-deep-drawing>, pristup 15. listopada 2021. godine
- [27] Adnan I. O. Zaid. Effect of Different Lubricants on Deep Drawing of Galvanized Steel. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8; 2017.
- [28] Adnan I. O. Zaid, Deep drawing mechanism, parameters, defects and recent results: state of the art. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering; 2016.
- [29] Krivulja plastičnog tečenja i tehnički podaci materijala St 34. Interni materijali katedre za oblikovanje deformiranjem