

Hidrooblikovanje lima

Mance, Mario

Master's thesis / Diplomski 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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:225231>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mario Mance

Zagreb, 2019. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Mario Mance

Zagreb, 2019. godina

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Zdenki Keran koja mi je svojim znanjem i stručnim savjetima pomogla tijekom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem se svim svojim kolegama i prijateljima koji su tijekom mog studiranja učinili zabavnijim i uvijek bili uz mene.

I na kraju, veliko hvala mojoj obitelji na motivaciji i podršci tijekom svih ovih godina studiranja jer bez njih ne bih ovo postigao.

Mario Mance



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске 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:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARIO MANCE** Mat. br.: **0035198557**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Hidrooblikovanje lima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Sheet hydroforming**

Opis zadatka:

Hidrooblikovanje je postupak oblikovanja duktilnih metala u hladnom stanju. Koristi se za oblikovanje limova i cijevi u geometrijski složene oblike. Specifičnost ovog postupka jest da se za prijenos sile koristi fluid pod visokim tlakom koji utiskuje materijal u kalupnu šupljinu.


U okviru diplomskog rada potrebno je proučiti, sistematizirati i opisati postupke hidrooblikovanja. Također, potrebno je shematski prikazati konstrukcije i načine rada najčešće korištenih strojeva za različite vrste izradaka. S obzirom na vrstu izradaka shematski prikazati i objasniti izvedbe alata. Obratiti pozornost na materijale i stanje naprezanja tijekom procesa hidrooblikovanja lima, a vezano uz stanje naprezanja, potrebno je objasniti pojavu i djelovanje trenja u procesu. Stanje naprezanja i deformacija usporediti i povezati sa procesom hidrauličkog udublivanja kao načinom snimanja krivulje tečenja materijala. Eksperimentalno provesti postupak hidrauličkog udublivanja aluminijskog lima, a numeričku simulaciju procesa napraviti nekim od komercijalnih programskih paketa za simulaciju velikih plastičnih deformacija. Usporediti eksperimentalne rezultate sa rezultatima dobivenim numeričkom simulacijom.

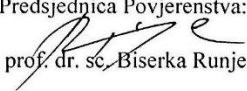
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:
28. studenog 2019.

Predvideni datum obrane:
04. prosinca 2019.
05. prosinca 2019.
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:
doc. dr.  Zdenka Keran

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Hidrooblikovanje	2
1.2. Materijali pogodni za hidrooblikovanje	4
1.3. Podjela postupaka hidrooblikovanja	5
2. HIDROOBLIKOVANJE CIJEVI.....	6
2.1. Sustav za hidrooblikovanje cijevi	6
2.2. Teorije za model hidrooblikovanja cijevi	8
2.3. Naprezanja i deformacije u procesu hidrooblikovanja cijevi.....	9
2.4. Trenje u procesu hidrooblikovanja cijevi.....	10
2.4.1. Mehanizmi trenja	12
2.4.2. Mehanizmi trenja kod hidrooblikovanja cijevi	13
2.4.3. Hidrooblikovanje cijevi s dominantnim utiskivanjem materijala.....	13
2.4.4. Hidrooblikovanje cijevi s dominantnim ekspanzijskim djelovanjem materijala	15
2.5. Maziva u procesu hidrooblikovanja	16
2.6. Tribološke pogreške u procesu hidrooblikovanja cijevi	17
2.7. Prednosti i nedostaci procesa hidrooblikovanja cijevi.....	18
3. HIDROOBLIKOVANJE LIMOVA	20
3.1. Hidrooblikovanje limova pomoću žiga.....	21
3.2. Hidrooblikovanje limova pomoću kalupa.....	22
3.3. Hidrooblikovanje limova – različiti postupci procesa	22
3.3.1. Hidrooblikovanje lima s membranom.....	22
3.3.2. Kombinacija hidrooblikovanja žigom s postupcima prešanja	24
3.3.3. Hidrooblikovanje dvostrukih limova	25
3.4. Zone trenja kod hidrooblikovanja limova.....	27
3.5. Stanje naprezanja i deformacija kod hidrooblikovanja pomoću žiga	28
3.6. Tribološke pogreške u procesu hidrooblikovanja limova	29
3.7. Prednosti i nedostaci hidrooblikovanja	33
4. STROJEVI I ALATI ZA HIDROOBLIKOVANJE.....	35
4.1. Hidraulične preše	35
4.2. Preše za hidrooblikovanje pomoću žiga.....	37
4.2.1. Preše za hidrooblikovanje pomoću kalupa.....	38
4.2.2. Preša za hidrooblikovanje cijevi	39
4.3. Alati za hidrooblikovanje lima.....	40
4.4. Alati za hidrooblikovanje cijevi	43
4.5. Hidraulički sustav za hidrooblikovanje.....	44

4.6. Kontrolni i regulacijski sustav	45
5. Hidrauličko udubljivanje	46
5.1. Osnovni pojmovi hidrauličkog udubljivanja.....	46
5.2. Pretpostavke o shemi deformacija kod hidrauličkog udubljivanja	49
5.3. Uvjet plastičnog tečenja	49
5.4. Krivulja plastičnog tečenja.....	50
6. MJERENJA	52
6.1. Naprava za hidrauličko udubljivanje	52
6.2. Postupak i rezultati eksperimentalnog mjerenja	54
7. RAČUNALNA SIMULACIJA	57
7.1. Parametri simulacije.....	57
7.2. Rezultati numeričke simulacije	59
7.3. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata.....	62
8. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66
PRILOZI.....	69

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema prve hidraulične preše [2].....	1
Slika 2.	Preša za hidrooblikovanje proizvođača VariForm [4]	2
Slika 3.	Hidrooblikovano bakreno koljeno za vodu [6].....	3
Slika 4.	Podjela postupaka hidrooblikovanja [10].....	5
Slika 5.	Komponente sustava za hidrooblikovanje cijevi [12]	7
Slika 6.	Proces hidrooblikovanja cijevi [11]	8
Slika 7.	Stanje naprezanja u procesu hidrooblikovanja cijevi [13]	9
Slika 8.	Međudjelovanje alata i priprema u procesu hidrooblikovanja cijevi [12].....	10
Slika 9.	Zone trenja u procesu hidrooblikovanja cijevi [12]	12
Slika 10.	Stribeckova krivulja s različitim mehanizmima trenja [13]	13
Slika 11.	Mehanizmi trenja u zoni vođenja [13]	14
Slika 12.	Mikro plasto hidrostatički i mikro plasto hidrodinamički mehanizam trenja [13] 15	
Slika 13.	Rubni uvjeti u zoni ekspanzije (a) i diferencijalni element A (b) [13].....	16
Slika 14.	Najčešće pogreške prilikom procesa hidrooblikovanja [15]	18
Slika 15.	Hidrooblikovani okvir bicikla [17].....	19
Slika 16.	Hidrooblikovani okvir šasije [18].....	19
Slika 17.	Hidrooblikovani stražnji okvir s ostalim komponentama modela Mazda MX-5 Roadster [19]	19
Slika 18.	Komponente sustava za hidrooblikovanje limova [12].....	20
Slika 19.	Usporedba procesa dubokog vučenja (a) i hidrooblikovanja žigom (b) [21].....	21
Slika 20.	Faze hidrooblikovanja lima pomoću kalupa [10].....	22
Slika 21.	Shematski prikaz hidrooblikovanja pomoću membrane [22].....	23
Slika 22.	Proizvod u raznim fazama hidrooblikovanja [22]	23
Slika 23.	Proces hidrooblikovanja lima s membranom [23]	24
Slika 24.	Kombinacija procesa hidrooblikovanja žigom i klasičnih postupaka oblikovanja [21]	25
Slika 25.	Shematski prikaz hidrooblikovanja dvostrukih limova [10]	26
Slika 26.	Hidrooblikovani rezervoar goriva [24].....	26
Slika 27.	Hidrooblikovani B stup automobila Ford Fusion 2013 [25]	27
Slika 28.	Shematski prikaz međudjelovanja alata i priprema uz pripadajuće varijable procesu i zone trenja [13]	28
Slika 29.	Tipične zone deformacije kod hidrooblikovanja pomoću žiga [26].....	29
Slika 30.	Shematski prikaz izbočenja kod hidrooblikovanja i gornja tlačna komora [27]... 29	
Slika 31.	Shematski prikaz preše s elastičnim pinovima u tlačnoj komori [21].....	30
Slika 32.	Procesno područje definirano silom držanja priprema i tlaka tlačne komore kod hidrooblikovanja pomoću žiga [28]	31
Slika 33.	Utjecaj različitih parametara na pogreške tijekom hidrooblikovanja [29]	32
Slika 34.	Procesno područje definirano silom držanja priprema i tlaka tlačne komore kod hidrooblikovanja pomoću kalupa [28]	33
Slika 35.	Shema jednoradne (a), i dvoradne hidraulične preše (b) [13]	36
Slika 36.	Shematski prikaz preše za hidrooblikovanje pomoću žiga [31].....	37
Slika 37.	Vađenje proizvoda nakon završetka ciklusa hidrooblikovanja [31]	38
Slika 38.	Horizontalna preša za hidrooblikovanje limova [28].....	39
Slika 39.	Sustav za hidrooblikovanje cijevi [33]	40
Slika 40.	Williams-White 4000 tonska preša za hidrooblikovanje cijevi [35].....	40
Slika 41.	Hidrooblikovanje lima pomoću kalupa [13]	41
Slika 42.	Hidrooblikovanje lima s gumenom membranom [13]	41
Slika 43.	Donji dio alata preše za hidrooblikovanje [36]	42

Slika 44.	Proizvod dobiven hidrooblikovanjem lima gumenom membranom [37]	42
Slika 45.	Hidrooblikovanje lima pomoću žiga [13]	42
Slika 46.	Alat za hidrooblikovanje limova [36]	43
Slika 47.	Donja polovica kalupa za hidrooblikovanje okvira šasije za oslanjanje motora [39]	44
Slika 48.	Kalup za hidrooblikovanje ispušnih komponenti automobila [39]	44
Slika 49.	Korisničko sučelje preše za hidrooblikovanje QFM 0,8-800 [36]	45
Slika 50.	Shema hidrauličkog udubljivanja [41]	46
Slika 51.	Osnosimetrična ljuska s pripadajućim osnovnim veličinama [41].....	47
Slika 52.	Diferencijalni element membrane [41].....	48
Slika 53.	Naprava za hidrauličko udubljivanje.....	52
Slika 54.	Rondela prije i nakon hidrauličkog udubljivanja	52
Slika 55.	Presjek centralnog dijela naprave za hidrauličko udubljivanje [41]	53
Slika 56.	Hidraulična shema naprave za hidrauličko udubljivanje lima [41].....	53
Slika 57.	Uređaj za mjerenje debljine.....	54
Slika 58.	Eksperimentalni rezultati ovisnosti visine ispuščenja rondele o tlaku.....	55
Slika 59.	Eksperimentalni rezultati ovisnosti debljine stijenke rondele o tlaku	56
Slika 60.	Mreža konačnih elemenata	58
Slika 61.	Simulacija visine ispuščenja rondele opterećene tlakom.....	59
Slika 62.	Ovisnost visine ispuščenja rondele o tlaku dobivene računalnom simulacijom ..	60
Slika 63.	Ovisnost ekvivalentne ukupne deformacije o tlaku dobivene računalnom simulacijom	61
Slika 64.	Simulacija ukupne plastične deformacije rondele opterećene tlakom	61
Slika 65.	Usporedba visine ispuščenja dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom	63
Slika 66.	Usporedba debljine stijenke dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Najčešće primijenjeni materijali i njihova svojstva u hidrooblikovanju.....	4
Tablica 2. Eksperimentalni rezultati visine ispučenja i debljine stijenke ronđele na polu A55	
Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva za materijal Al 99,5.....	57
Tablica 4. Rezultati visine ispučenja ronđele dobiveni računalnom simulacijom	59
Tablica 5. Rezultati ukupne plastične deformacije i debljine stijenke ronđele dobiveni računalnom simulacijom	61
Tablica 6. Uspoređba visine ispučenja dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom	62
Tablica 7. Uspoređba debljine ronđele dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom	63

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	polumjer matrice hidrauličkog udubljenja
A		pol ispučenja
d_0	mm	promjer cijevi
E	N/mm ²	Youngov modul elastičnosti
F_A	N	aksijalna sila
F_{BH}	N	sila držanja priprema
F_N	N	normalna sila između cijevi i kalupa
F_P	N	sila žiga
h	mm	visina ispučenja
$h_{A,eksp}$	mm	eksperimentalna visina ispučenja ronđele
$h_{A,num}$	mm	numerička visina ispučenja ronđele
HB		tvrdća po Brinellu
k_f	N/mm ²	naprezanje plastičnog tečenja
$MPHDT$		mikro plasto hidrodinamički mehanizam trenja
$MPHST$		mikro plasto hidrostatički mehanizam trenja
p	MPa	tlak hidrauličkog medija
p_e	MPa	tlak prilikom međudjelovanja alata i priprema
PLC		programabilni logički kontroler
p_u	MPa	unutarnji tlak
q	MPa	tlak maziva
r	mm	radijus zakrivljenosti ljuske
r_c	mm	cirkularni polumjer zakrivljenosti
r_{exp}	mm	radijus cijevi
r_m	mm	meridijanski polumjer zakrivljenosti
s_0	mm	početna debljina lima
$s_{A,eksp}$	mm	eksperimentalna debljina stijenke ronđele
$s_{A,num}$	mm	numerička debljina stijenke ronđele
t_0	mm	debljina stijenke cijevi
V	m/s	brzina
v	m/s	brzina klizanja
V_1, V_2	m/s	posmična brzina
V_{exp}	m/s	relativna brzina klizanja
ΔL	mm	širina diferencijalnog elementa cijevi
$\varepsilon_{pl,num}$		ekvivalentna plastična deformacija
$\varepsilon_{uk,num}$		ekvivalentna ukupna deformacija
η	Pas	viskoznost maziva
θ	°	kut diferencijalnog elementa cijevi

ρ	kg/m ³	gustoća
$R_{p0,2}$	MPa	konvencionalna granica tečenja
σ_a	N/mm ²	aksijalna komponenta naprezanja
σ_c	N/mm ²	cirkularno naprezanje
σ_{ekv}	N/mm ²	ekvivalentno naprezanje
σ_m	N/mm ²	meridijansko naprezanje
σ_r	N/mm ²	radijalna komponenta naprezanja
σ_t	N/mm ²	normalna komponenta naprezanja
τ_s	N/mm ²	tangencijalno naprezanje
ν		Poissonov omjer
φ		prirodna deformacija
φ_c		cirkularna deformacija
φ_{ekv}		ekvivalentna deformacija
φ_m		meridijanska deformacija

SAŽETAK

Postupci kojima je primarno svojstvo deformacija materijala čine visok udio u današnjoj industriji. Proces izrade proizvoda konstantno se pokušava dovesti na višu razinu novim i poboljšanim postupcima oblikovanja materijala.

Na početku rada opisan je proces hidrooblikovanja i njegova povijest, podjela te korišteni materijali. Također je opisan proces hidrooblikovanja cijevi i limova sa stanjem naprezanja i djelovanjem trenja u oba postupka. Shematski su prikazane i objašnjene konstrukcijske izvedbe i načini rada strojeva i alata za hidrooblikovanje.

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je postupak hidrauličkog udublivanja aluminijskog lima debljine 1 mm. Također je provedena numerička simulacija u programskom paketu ANSYS 2019 R3. Uspoređeni su eksperimentalno i numerički dobiveni rezultati.

Ključne riječi: Hidrooblikovanje cijevi, hidrooblikovanje lima, naprezanje, deformacija, hidrauličko udublivanje, tlak, fluid

SUMMARY

Processes in which primary feature is deformation of material have a large share in today's industry. The product manufacturing process is constantly being improved to a higher level through implementation of new and enhanced processes of material deformation.

In the beginning of this study, the hydroforming process, history, division and materials are described. Furthermore, process of tube and sheet hydroforming with stress state and friction influence will be discussed. In addition, schematics of design and working principle of machines and tools for hydroforming will be described.

In experimental part of this study a hydraulic bulge test of aluminium sheet with 1 mm thickness is carried out. Also, the numerical simulation in ANSYS 2019 R3 program package is performed.

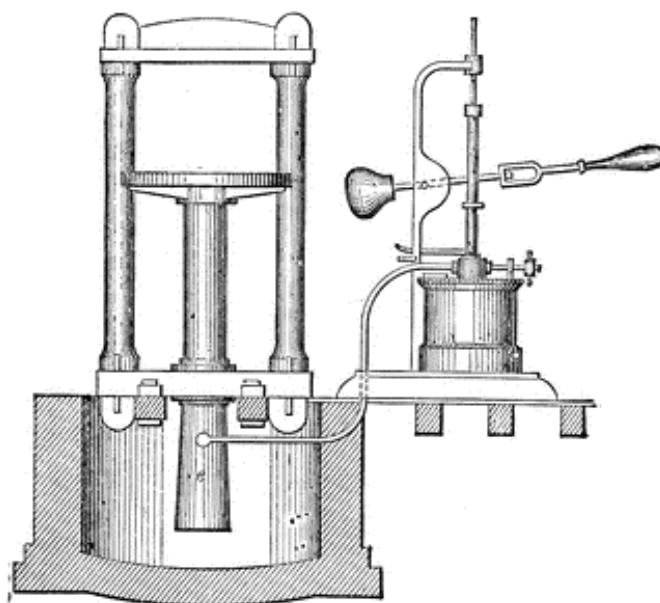
The results obtained in the experiment and numerical simulation will be compared.

Key words: Tube hydroforming, Sheet hydroforming, stress, strain, hydraulic bulge test, pressure, fluid

1. UVOD

Visok udio proizvoda kakve danas znamo bilo bi vrlo teško ili nemoguće izraditi bez postupaka kojima je primarno svojstvo deformacija materijala. Obrada metala deformiranjem je postupak gdje se oblik sirovca mijenja odnosno deformira pomoću alata bez promjene početnog volumena i mase, a bila je zastupljena još u dalekoj povijesti čovječanstva.

Tijekom povijesti primarni cilj ljudi bio je dizajnirati alate i strojeve pomoću koji bi se olakšala izrada predmeta potrebnih za svakodnevni život, a jedan od takvih alata je hidraulična preša prikazana na slici 1. koju je izumio engleski inovator Joseph Bramah krajem osamnaestog stoljeća. Hidraulična preša temelji se na Pascalovom zakonu koji govori da se u tekućini koja se nalazi u zatvorenoj posudi tlak širi jednoliko u svim smjerovima. Preša se sastojala od dva cilindra različitih poprečnih presjeka. Sila na manjem klipju generirana polugom stvorila bi silu većeg iznosa na većem klipju jednakomjernim širenjem tlaka. Sila koja podiže veći klip veća je od sile na manjem klipju za onoliko koliko je površina presjeka većeg klipja veća od površine presjeka manjeg klipja. [1]



Slika 1. Shema prve hidraulične preše [2]

Konstantnim ulaganjem u istraživanje, razvoj i unaprjeđenje tehnologije i novih materijala razvila se industrija koja je oblikovala današnji svijet. Proces izrade proizvoda svakodnevno se pokušava dovesti na višu razinu novim postupcima oblikovanja koje odlikuju kvaliteta i svojstva proizvoda koja premašuju postavljene zahtjeve kupaca. U daljnjem potpoglavlju objašnjena je povijest i dane su informacije o procesu hidrooblikovanja te podjela procesa.

1.1. Hidrooblikovanje

Hidrooblikovanje je moderan postupak koji omogućuje deformaciju i oblikovanje materijala u koje spadaju različite vrste čelika, bakra, aluminijska, mjed i drugi. Ovim postupkom materijal koji može biti u obliku cijevi ili limene ploče oblikuje se pomoću tlaka fluida.

Razvoj hidrooblikovanja počeo je sredinom prošlog stoljeća kada je počeo nagli razvoj industrije u Americi. Osamdesetih godina prošlog stoljeća, tvrtke kao što su Vari-Form, General Motors, Hydrodynamic Technologies pokrenule su razvoj ovog postupka u Americi. Razvoj u Europi počeo je u Njemačkoj od strane tvrtki kao što su Schuler, SPS te sveučilište u Stuttgartu. Prvi hidrooblikovani proizvod u serijskoj proizvodnji bila je greda instrument ploče za model Chrysler minivan predstavljena devedesetih godina prošlog stoljeća od tvrtke Vari-Form. Na slici 2. prikazana je preša na kojoj su se proizvodile grede instrument ploče kao i niz drugih dijelova za nekoliko generacija Dodge, Chrysler i Plymouth vozila. 1994. godine predstavljen je hidrooblikovani okvir šasije za modele Ford Contour i Mystique.

Popularnost hidrooblikovanja tada je dovela do širenja tog postupka na područje izrade komponenata ispušnog sustava kao i razne elemente ovjesa automobila. [3]



Slika 2. Preša za hidrooblikovanje proizvođača VariForm [4]

Osnovu procesa hidrooblikovanja čini stavljanje sirovog materijala u alat, zatvaranje kalupa i primjena tlaka fluida na limenu ploču ili unutar cijele šupljine cijevi. Porast tlaka fluida uzrokuje plastičnu deformaciju sirovca i omogućuje materijalu da popuni kalupnu šupljinu. Takvim načinom oblikovanja dobivaju se proizvodi visoke čvrstoće, krutosti uz zadržavanje male mase što dovodi do učestale primjene ovog postupka u autoindustriji. [3]

Mnoge grane industrije među kojima se ističu automobilska, zrakoplovna i svemirska industrija traže nove proizvodne procese i načine unaprjeđenja istih kako bi se smanjili troškovi proizvodnje te istovremeno dizajnirali i izradili proizvodi manje mase, boljih mehaničkih i kemijskih svojstava. Jedan od tih procesa je hidrooblikovanje. Iako je razvoj ovog procesa relativno nov u autoindustriji, mnoge bitne varijable ovog postupka već su poznate i istražene uključujući svojstva materijala, mehanizme trenja, vrijednosti tlakova te sam proces deformacije materijala. Tehnologija hidrooblikovanja je pokazala niz prednosti u serijskoj proizvodnji posebice u autoindustriji koje se odnose na izradu dijelova složene geometrije, kvalitetu i strukturu završnog proizvoda ako se uzima u obzir da su proizvodi izrađeni s manjim brojem komponenata eliminirajući nepotrebne operacije zavarivanja što dovodi do ekonomske isplativosti procesa. [5]

Hidrooblikovanje cijevi kakvo danas znamo, za izradu većih proizvoda ima nekoliko početaka. Proces koji je danas najčešće korišten baziran je na onome koji je upotrebljen za izradu bakrenog koljena za vodu u obliku slova T prikazano na slici 3. čiji je sirovac ravna okrugla cijev koja upotrebom visokog unutarnjeg tlaka fluida izravno poprima oblik gotovog proizvoda, te se nakon toga gura dodatna količina materijala u kalup kako bi se kompenziralo izduženje stijenke. [6]

Taj proces adaptirao se za izradu proizvoda još većih dimenzija. Bitne značajke ovog postupka prema [6] su:

- Kalup je zatvoren prije ubrizgavanja fluida
- Fluid je primarno sredstvo za oblikovanje proizvoda
- Poprečni presjek se širi
- Primjena relativno visokih tlakova



Slika 3. Hidrooblikovano bakreno koljeno za vodu [6]

1.2. Materijali pogodni za hidrooblikovanje

Izbor materijala za izradu proizvoda temelji se na nekoliko parametara koji osiguravaju njegovu konkurentnost na tržištu. Prema tome materijal mora omogućiti pravilnu funkciju proizvoda, zadovoljiti traženu kvalitetu, malu masu, zadovoljavajuća mehanička i kemijska svojstva, te pritom biti cjenovno pristupačan. Metali pogodni za hladno oblikovanje koji imaju izraženo svojstvo duktilnosti odnosno mogućnost plastične deformacije bez pojave loma također se mogu podvrgnuti postupku hidrooblikovanja. [3]

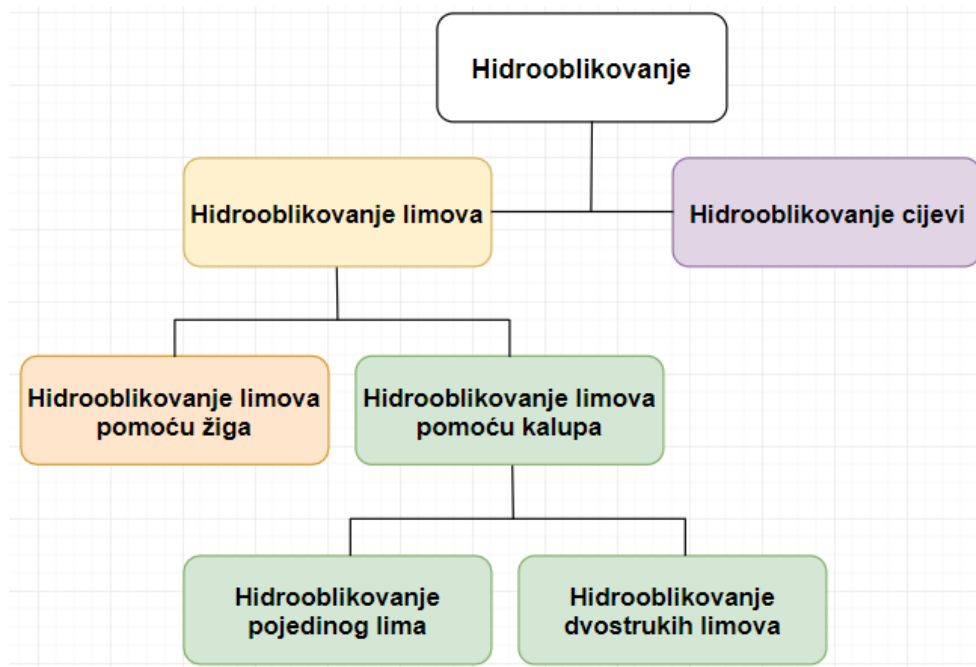
Legirani čelici i aluminijske legure prema [7] trenutno su najčešće korišteni materijali u postupcima oblikovanja deformiranjem odnosno u postupku hidrooblikovanja. Također se koriste legure od bakra, inkonel i titan. Navedeni materijali i njihova mehanička svojstva prema [8] i [9] prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Najčešće primijenjeni materijali i njihova svojstva u hidrooblikovanju

Materijal	Gustoća, kg/m ³	Youngov modul elastičnosti, N/mm ²	Granica tečenja, N/mm ²	Poissonov omjer	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Tvrdoća, HB
Čelik						
1.0038	7800	190	210	0.29	400	120
1.0045	7800	190	330	0.29	530	150
1.0982	7800	190	460	0.29	600	200
1.7218	7800	190	410	0.29	610	180
1.8827	7800	190	440	0.29	620	180
Nehrđajući čelik						
1.4301	7900	200	220	0.28	600	200
1.4828	7900	200	260	0.28	650	190
1.4404	7900	190	240	0.28	600	190
1.4835	7700	200	350	0.28	750	180
1.4510	7700	200	270	0.28	510	170
Aluminij						
Al 2024-T3	3000	71	320	0.33	480	120
AL 5005-F	2700	68	46	0.33	110	50
AL 6060-T4	2700	68	71	0.33	140	45
AL 6082-T4	2700	69	120	0.33	230	58
Titan						
3.7025	4500	110	220	0.32	310	120
3.7165	4400	110	920	0.32	1050	330
Inkonel						
Inkonel 625	8500	209	500	0.278	900	220
Inkonel 718	8200	205	1030	0.294	1230	340

1.3. Podjela postupaka hidrooblikovanja

Hidrooblikovanje se prema slici 4. može podijeliti na dvije glavne vrste, hidrooblikovanje limova i hidrooblikovanje cijevi uz dodatnu podjelu postupka hidrooblikovanja limova. Limovi se mogu hidrooblikovati pomoću žiga ili pomoću kalupa.



Slika 4. Podjela postupaka hidrooblikovanja [10]

Prema [10], uspješna primjena postupaka hidrooblikovanja zahtijeva uzimanje u obzir svih aspekata sustava koji omogućuje hidrooblikovanje kao što su:

- Kvaliteta i svojstva priprema
- Trenje i podmazivanje alata odnosno kalupa
- Konstrukcija i geometrija alata za učinkovitu primjenu stezne sile kojom se pridržava priprema u svrhu sprečavanja curenja medija
- Odnos između unutarnjeg tlaka fluida i sile držanja priprema
- Konstrukcija i karakteristike preša
- Dimenzije i svojstva hidrooblikovanog proizvoda

2. HIDROOBLIKOVANJE CIJEVI

Hidrooblikovanje cijevi je postupak deformacije materijala odnosno cijevi koje mogu biti ravne ili prethodno zakrivljene. Cijevi se mogu oblikovati u kompleksne oblike pomoću kalupne šupljine koju čine dvije polovice kalupa, gornja i donja, simultanom primjenom unutarnjeg pritiska odnosno tlaka fluida i aksijalnih sila koje generiraju bočni cilindri. [11]

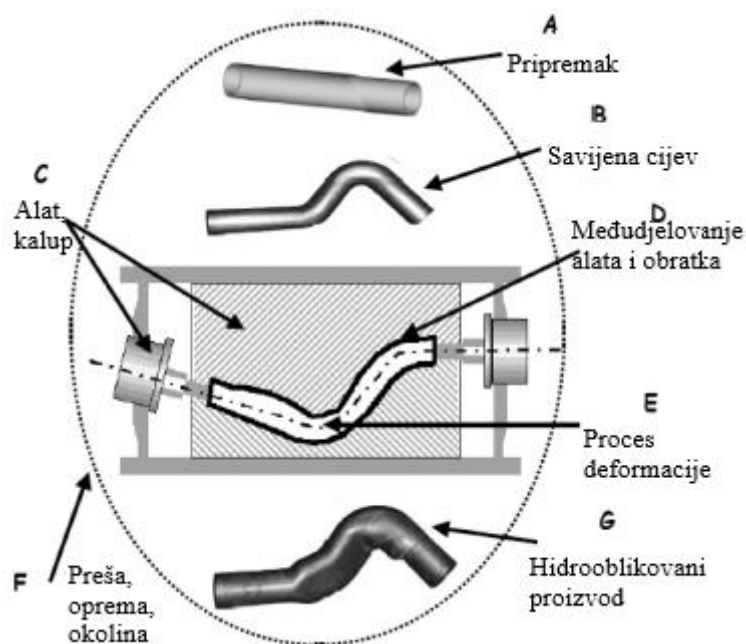
Kod hidrooblikovanja cijevi pritisak se primjenjuje u unutrašnjosti cijevi. Tijekom procesa prisutno je nekoliko razina tlaka fluida. Cijev se umeće unutar kalupa željenog oblika i presjeka, te se potom puni radnim fluidom, a unutrašnji tlak uzrokuje oblikovanje cijevi prema konturama kalupa. Konstantni unutarnji pritisak ostvaruje se pomoću hidraulične pumpe i medija. [11]

Kvaliteta materijala priprema ključna je za uspješan proces hidrooblikovanja. Izbor materijala temelji se na nekoliko bitnih parametara kao što su željena završna svojstva proizvoda, proces oblikovanja i mogućnost potencijalnih pogrešaka tijekom deformacije. Nejednaka svojstva priprema ili nejednak promjer stijenke može imati utjecaj na prerano stvaranje mikropukotina. Oblikovljivost se može definirati kao sposobnost materijala da se deformira određenim postupkom iz početnog oblika odnosno sirovca do završnog željenog oblika bez pojave pogreške odnosno pukotina ili loma te su svi materijali s takvim svojstvom pogodni za hidrooblikovanje. Ono se također može poboljšati hidrooblikovanjem na povišenim temperaturama¹. Najčešće korišteni materijali za izradu raznih proizvoda u današnjim industrijama ovim postupkom su niskolegirani čelici, nehrđajući čelici, visokolegirani čelici, aluminij, bakar, magnezij, mjed i drugi. [12]

2.1. Sustav za hidrooblikovanje cijevi

Prema [12], postoji nekoliko zasebnih komponenata koje čine sustav za hidrooblikovanje među kojima su priprema odnosno materijali različitih oblika, stroj odnosno preša s alatima i kalupima te različita oprema i pomoćna sredstva potrebna za kvalitetno i sigurno odvijanje procesa što je prikazano na slici 5.

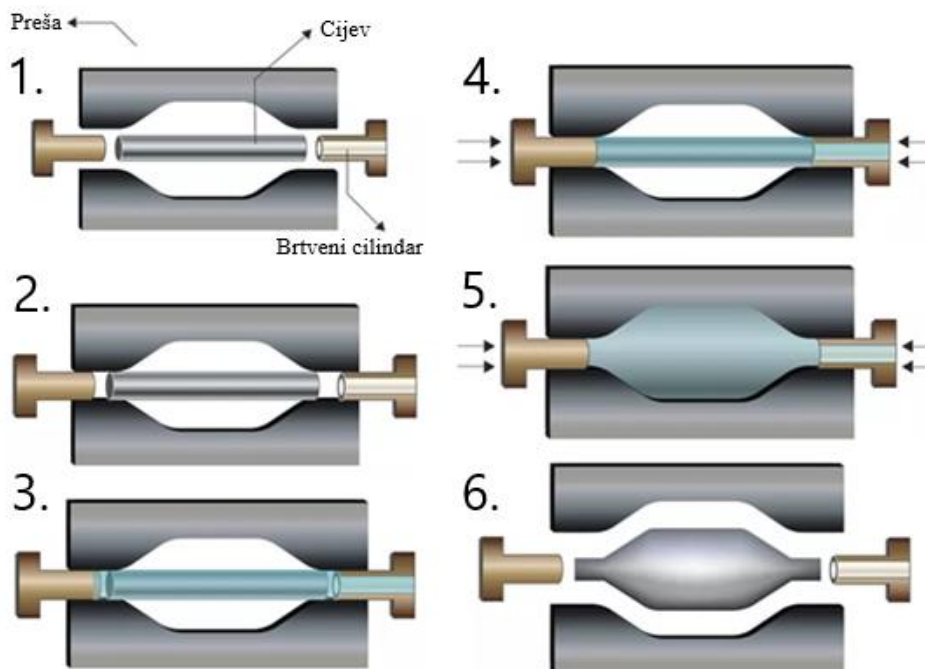
¹ Hidrooblikovanje na povišenim temperaturama vrlo je ograničeno temperaturom plamišta korištenog fluida.



Slika 5. Komponente sustava za hidrooblikovanje cijevi [12]

Prema [11], proces hidrooblikovanja cijevi može se podijeliti u nekoliko koraka, te je prikazan je na slici 6.

1. Cijev se pozicionira u kalup predviđen za hidrooblikovanje. Ako željeni oblik cijevi nije ravnog presjeka, cijev se mora prethodno savijati u željeni oblik kako bi se mogla pozicionirati u kalup.
2. Ravna ili savijena cijev umetnuta je u kalup preše za hidrooblikovanje koji se potom zatvara. Aksijalni cilindri zabrtve cijev.
3. Kroz brtveni cilindar cijev se napuni fluidom.
4. Aksijalni cilindar gura cijev da ispuni kalup, vrijednost tlaka unutar cijevi se povećava.
5. Aksijalni cilindar posmičnom brzinom gura cijev kako bi ona ispunila kalup, unutarnji pritisak postiže maksimalnu zadanu vrijednost te cijev u potpunosti poprima oblik kalupa. Aksijalne sile koje stvaraju cilindri i prirast deformacije odnosno povećanje tlaka simultano su kontrolirani u svrhu poboljšanja oblikovljivosti odnosno sposobnosti priprema da zauzme konturu kalupa.
6. Nakon što je cijev potpuno oblikovana, aksijalni cilindri se vraćaju u početan položaj, proizvod se vadi iz kalupa i čisti, te prema zahtjevima priprema za lasersko rezanje ili slične operacije.



Slika 6. Proces hidrooblikovanja cijevi [11]

2.2. Teorije za model hidrooblikovanja cijevi

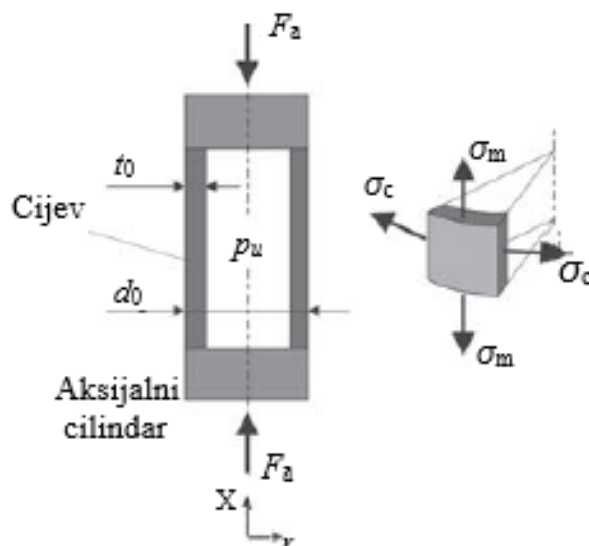
Prema [13] postoji nekoliko teorija na kojima se temelji model i postupak hidrooblikovanja cijevi kako bi se поближе prikazalo stanje naprezanja, plastičnih deformacija i opterećenja:

1. Teorija membrane, gdje je glavna pretpostavka da je tankostjena površinska struktura napregnuta s konstantnim normalnim naprezanjem dok su naprezanja na savijanje zanemariva. Ova teorija daje statički definiran sustav, a naprezanja je moguće izračunati direktno iz jednadžbi sila koje djeluju na tankostjenu površinsku strukturu.
2. Teorija ljusaka, gdje su uvedene pretpostavke da se normalna naprezanja okomita na površinsku strukturu ljuske zanemaruju, poprečni presjeci su ravninski i da nema deformacija između vanjske i unutarnje strukture površine. Također je bitno napomenuti da jednadžbe iz rubnih uvjeta sila i momenata opisuju statički nedefiniran sustav pa je za određivanje stanja naprezanja potrebno uračunati pojavu deformacija na temelju čega se postavljaju diferencijalne jednadžbe i dobiva krajnje rješenje.
3. Teorija plastičnosti, odnosno grana mehanike kontinuuma koja opisuje odnose između naprezanja i deformacija dok se promatrano tijelo nalazi u plastičnom stanju. Također se istražuju uvjeti tečenja materijala. Tijekom plastične deformacije materijala njegova gustoća ostaje nepromijenjena iz čega slijedi pretpostavka da je volumen prije i nakon deformacije nepromijenjen. Na temelju toga postavljaju se diferencijalne jednadžbe za lokalno stanje naprezanja.

4. Metoda konačnih elemenata, čija je osnovna karakteristika da se promatrano tijelo podijeli na određen broj geometrijski jednostavnih konačnih elemenata povezanih u točkama koje se zovu čvorovi. U postupku oblikovanja deformiranjem nepoznate varijable čine prostornu raspodjelu čvorova svakog konačnog elementa. Odnos između nepoznanica i pripadajuće vrijednosti čvorova opisan je elementarnim jednadžbama koje opisuju problem, a taj odnos ovisi o svojstvima promatranog materijala. Raspodjela naprezanja i deformacija promatranog predmeta dobiva se iz numeričkog rješenja globalnih jednadžbi.

2.3. Naprezanja i deformacije u procesu hidrooblikovanja cijevi

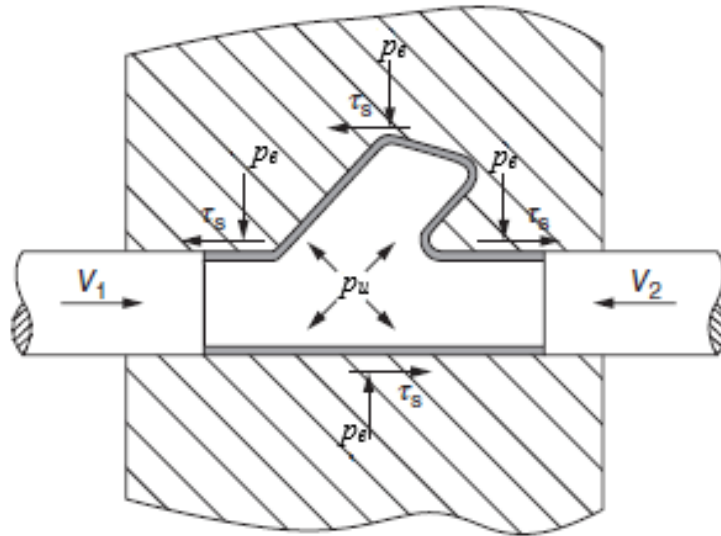
Glavna naprezanja koja djeluju na diferencijalnom elementu u procesu hidrooblikovanja cijevi prikazana su na slici 7. gdje je σ_c cirkularno naprezanje koje djeluje u horizontalnom smjeru, a σ_m meridijansko naprezanje koje djeluje u okomitom smjeru tangencijalno na diferencijalni element i okomito u odnosu na cirkularno naprezanje. Oba naprezanja nastaju zbog djelovanja unutarnjeg tlaka p_u na cijev promjera d_0 i debljine stijenke t_0 dok aksijalni cilindri osiguravaju potrebnu aksijalnu silu F_a . Diferencijalni element prikazan je u obliku tankostijene osno simetrične ljuske kao i kod postupka hidrauličkog udublivanja koji je primjer pojednostavljenog procesa hidrooblikovanja a sadržava sve specifične elemente deformiranja djelovanjem tlaka fluida. Izvod naprezanja objašnjen je u potpoglavlju 5.1 gdje su postavljeni uvjeti ravnoteže na diferencijalni element membrane odnosno sumirane su sile koje djeluju u smjeru normale.



Slika 7. Stanje naprezanja u procesu hidrooblikovanja cijevi [13]

Na slici 8. prikazano je međudjelovanje alata i priprema u procesu hidrooblikovanja cijevi gdje su varijable procesa unutarnji tlak p_u , tlak prilikom međudjelovanja alata i priprema p_c ,

tangencijalno naprezanje koje nastaje kao posljedica trenja τ_s , i posmične brzine V_1 i V_2 kojom aksijalni cilindri guraju cijev u kalup.



Slika 8. Međudjelovanje alata i priprema u procesu hidrooblikovanja cijevi [12]

2.4. Trenje u procesu hidrooblikovanja cijevi

Parametri koji utječu na trenje, podmazivanje i trošenje kod procesa hidrooblikovanja cijevi mogu se prema [13] kategorizirati u 3 skupine:

- Procesni parametri
 - Brzina klizanja
 - Temperatura
 - Tlak
 - Ekspanzija i kontrakcija površine
- Parametri alata i priprema
 - Svojstva materijala
 - Topografija površine
 - Razina hrapavosti površine
 - Geometrija
 - Površinski premaz
- Parametri maziva
 - Viskoznost
 - Kemijski sastav
 - Stabilnost tlaka
 - Debljina filma
 - Kompatibilnost sa sekundarnim operacijama

Prema [12] postoje tri različite zone u tipičnom procesu hidrooblikovanja cijevi, a prikazane su na slici 9. :

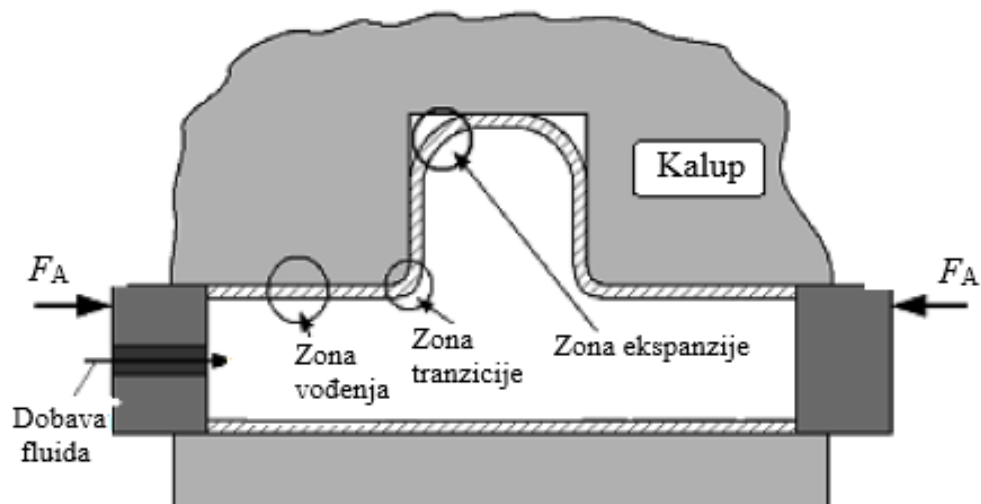
- Zona vođenja
- Zona tranzicije
- Zona ekspanzije

U zoni vođenja pripremak i alat u potpunosti su u kontaktu, materijal se gura u zonu deformacije pomoću aksijalnih cilindara a deformacija materijala događa se u obliku stanjivanja stijenke. Proces hidrooblikovanja cijevi većinom zahtijeva da se materijal pomiče prema zoni ekspanzije, prema tome, ovisno o geometriji proizvoda potrebna je relativno visoka brzina klizanja materijala (50-100 mm/s) između priprema i alata u zoni vođenja. Tlakovi na površinu su prosječnog iznosa, a aksijalni pritisak je visok. [13]

Brzina klizanja materijala osjetljiva je veličina čiji iznos direktno uzrokuje tribološke promjene odnosno ima utjecaj na uvjete podmazivanja. Njezinim povećanjem direktno se utječe na silu trenja koja se može smanjiti, ali i povećati. Povećanjem brzine klizanja također se povećava hidrodinamički tlak i oslobađa se više topline što uzrokuje smanjenje iznosa trenja. S druge strane, generiranjem topline smanjuje se viskoznost maziva i povećava kontaktno područje prilikom tečenja materijala što povećava silu trenja. [13]

U zoni tranzicije prevladava troosno stanje naprezanja s dominantnim tlačnim naprezanjima, brzina oblikovanja materijala u ovoj fazi sporija je u usporedbi sa zonom vođenja, kao i ekspanzija odnosno redukcija površine. U zoni ekspanzije i kalibracije zastupljeno je dvoosno stanje naprezanja s dominantnim vlačnim naprezanjima, aksijalni pomaci su maleni. Oblikovanje materijala dominantnije je u radijalnom smjeru nego u aksijalnom. Brzina klizanja ima niske vrijednosti, dok su vrijednosti površinskih deformacija i ekspanzije površine maksimalne. [13]

Zbog različitih iznosa lokalnih naprezanja i načina deformacije materijala u pojedinoj zoni deformacije tribološki uvjeti mogu se razlikovati i dovesti do različitih mehanizama podmazivanja. Zbog toga je bitno da su maziva i sustavi podmazivanja učinkoviti u svim zonama trenja posebice u zoni vođenja jer je ona najvažnija za uspješnu izradu proizvoda bez pogrešaka oblika. [12]



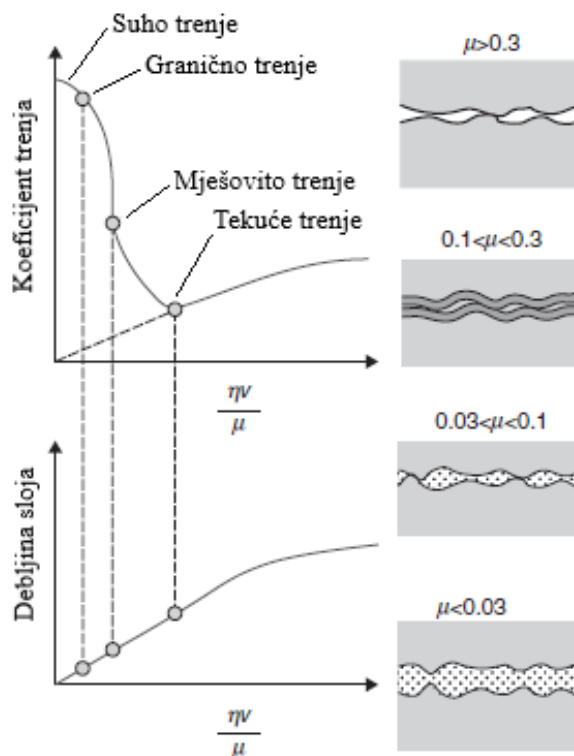
Slika 9. Zone trenja u procesu hidrooblikovanja cijevi [12]

2.4.1. Mehanizmi trenja

U postupcima deformiranja materijala prema [13] postoje četiri osnovne vrste podmazivanja koje opisuju režime trenja. Odnosi u sloju maziva između dvije površine opisuju se Stribeckovom krivuljom koja ovisi o nekoliko parametara. Slika 10. prikazuje četiri vrste podmazivanja koji direktno ovise o tlaku p , brzini klizanja v i viskoznosti maziva η .

1. Suho trenje – nema prisutnog maziva u međudjelovanju između alata i priprema, već je prisutan samo oksidni sloj, a površine se dodiruju u pojedinim točkama. Vrijednost faktora trenja veća je od 0,3. Trenje u ovom slučaju ima visoke vrijednosti te je kao takvo poželjno na primjer u postupku toplog valjanja ploča.
2. Granično trenje – zastupljen je tanki film odnosno granični sloj između dvije površine. Takav granični sloj služi kao barijera kada su prisutni uvjeti kontakta metala s drugim metalom. Površine se dodiruju na mjestima gdje je probijen granični sloj. Vrijednost faktora trenja je između 0,1 i 0,3. Također kao i u prvom slučaju vrijednosti trenja su visoke.
3. Mješovito trenje – najčešći oblik trenja prisutan u postupku deformiranja metala. Postupak hidrooblikovanja karakteriziraju visoki iznosi tlakova i relativno niske brzine klizanja pa prema tome hidrodinamički uvjeti ne mogu biti održani u potpunosti. U slučaju mješovitog trenja prisutan je samo djelomičan dodir između neravnina dviju površina zbog veće količine maziva prisutne u području kontakta. Vrijednost faktora trenja je između 0,03 i 0,1. Iznos trenja je niži u usporedbi s graničnim trenjem.

4. Tekuće trenje – nastaje kada je prisutan deblji sloj maziva između dvije kontaktne površine odnosno kalupa i pripremljena. Nema dodira između površina, a vrhove neravnina razdvaja sloj maziva. Vrijednost faktora trenja manja je od 0,03. Iznos trenja vrlo je nizak.



Slika 10. Stribeckova krivulja s različitim mehanizmima trenja [13]

2.4.2. Mehanizmi trenja kod hidrooblikovanja cijevi

Najčešća podjela kod postupka hidrooblikovanja cijevi je na postupak gdje je dominantno utiskivanje materijala aksijalnim cilindrima najčešće prilikom izrade proizvoda čiji je oblik sličan slovima T i Y. Suprotno tome drugi postupak karakterizira dominantno ekspanzijsko djelovanje materijala prilikom popunjavanja kalupne šupljine gdje utiskivanje materijala aksijalnim cilindrima nije toliko izraženo. Tipičan primjer takvih proizvoda su hidrooblikovani dijelovi šasije automobila. [13]

2.4.3. Hidrooblikovanje cijevi s dominantnim utiskivanjem materijala

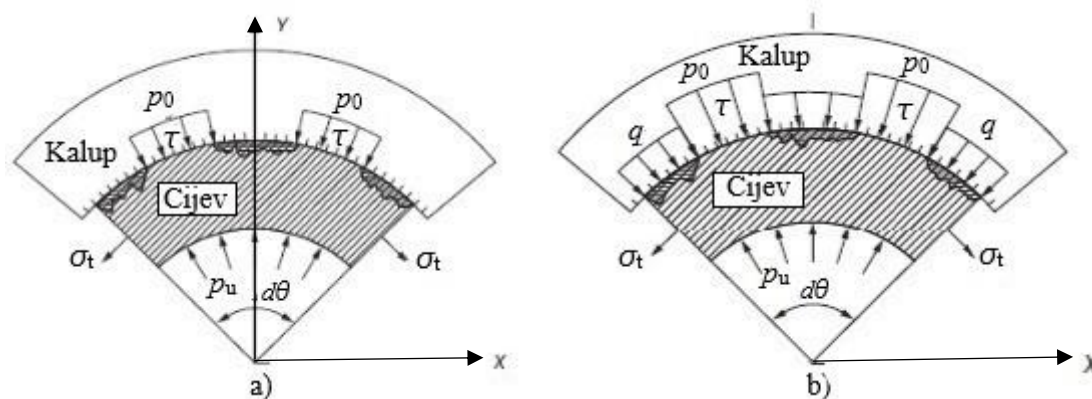
Kod hidrooblikovanja cijevi s dominantnim aksijalnim utiskivanjem materijala granične uvjete u zoni vođenja karakterizira određena količina maziva zarobljena prilikom međudjelovanja alata i pripremljena. Ako se dogodi da određena količina maziva izađe ona može jedino otići prema tranzicijskoj zoni. Također je moguće postići hidrodinamičko trenje s niskim faktorom trenja ako je dovoljna količina maziva prisutna između kontaktnih površina. [13]

Između kontaktnih površina alata i priprema mogu se, prema [13] pojaviti četiri vrste mehanizama trenja:

- Hidrostatičko trenje
- Granično trenje
- Mikro plasto hidrostatičko trenje (MPHST)
- Mikro plasto hidrodinamičko trenje (MPHDT)

Slika 11a. prikazuje diferencijalni element u zoni vođenja u tipičnom postupku hidrooblikovanja cijevi prilikom čega je cijev napregnuta pod unutarnjim tlakom p_u i aksijalno utisnuta u kalup brzinom V . Za uvjete graničnog trenja tlak maziva q bit će jednak nuli te će se taj mehanizam dogoditi kada je normalna sila između cijevi i kalupa F_N prenesena isključivo vrhovima površinskih neravnina. Takav mehanizam trenja može se dogoditi ako je vrijednost tlaka preniska da se generira hidrostatički efekt. [13]

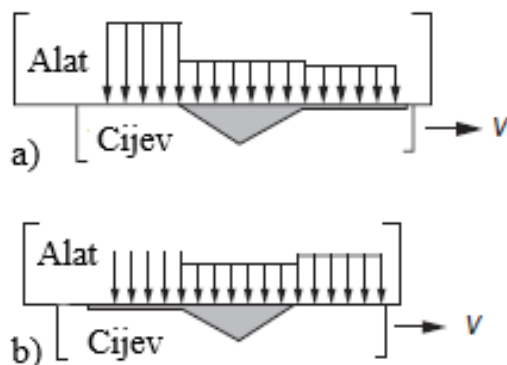
Slika 11b. prikazuje hidrostatički mehanizam trenja koji može nastati prilikom površinskog kontakta alata i cijevi kada je vrijednost unutarnjeg tlaka p_u dovoljna da se stvori hidrostatički efekt. Tada je normalna sila F_N nošena vrhovima površinskih neravnina i pomoću zarobljenog maziva unutar istih. Faktor trenja tada je značajno manji u usporedbi s graničnim mehanizmom trenja. [13]



Slika 11. Mehhanizmi trenja u zoni vođenja [13]

Mikro plasto hidrostatički (MPHST) i mikro plasto hidrodinamički mehanizam trenja (MPHDT) nastaje kada cijev klizi kroz kalup u zoni vođenja. Karakteristika MPHST mehanizma je da se pojavljuje kada tlak maziva q naraste iznad vrijednosti kontaktnog tlaka p_0 na rubu površinskih neravnina. U tom specifičnom slučaju čestice maziva izlaze iz "džepova" površinske neravnine te prate smjer klizanja sve dok vrijednost tlaka maziva ne postane jednaka vrijednosti kontaktnog tlaka (Slika 12a). Suprotno tome mikro plasto hidrodinamički mehanizam trenja (MPHDT) nastaje kao posljedica širenja zarobljenog maziva u područje kontakta gdje je ranije bilo prisutno granično podmazivanje kao posljedica relativnog klizanja

između kalupa i cijevi. Čestice maziva u ovom slučaju izlaze iz "džepova" u suprotnom smjeru od smjera klizanja. (Slika 12b.) [13]



Slika 12. Mikroplasto hidrostatički i mikroplasto hidrodinamički mehanizam trenja [13]

Oba mehanizma trenja poželjna su prilikom procesa hidrooblikovanja cijevi jer svojim djelovanjem reduciraju posmično naprezanje prilikom kontakta površinskih neravnina odvajajući ih tankim slojem maziva. Time se smanjuje sila trenja i njezina nepoželjna svojstva. Važno je napomenuti da sposobnost izlaženja čestica maziva iz "džepova" ovisi o viskoznosti maziva η , relativnoj brzini između cijevi i kalupa te geometriji "džepova" u površinskim neravninama površina alata i cijevi. Na geometriju "džepova" također utječe tečenje materijala i stanje naprezanja koje kod hidrooblikovanja cijevi ima normalnu komponentu σ_t , radijalnu komponentu σ_r i aksijalnu komponentu σ_a . [13]

2.4.4. Hidrooblikovanje cijevi s dominantnim ekspanzijskim djelovanjem materijala

Kod hidrooblikovanja cijevi s dominantnim ekspanzijskim djelovanjem materijala granične uvjete u ekspanzijskoj zoni karakterizira sposobnost čestica maziva da slobodno izlaze iz džepova površinskih neravnina prilikom međudjelovanja alata i cijevi. To se događa zbog utjecaja povećanja tlaka prilikom čega cijev poprima oblik kalupa. Vrsta korištenog maziva i geometrija završnog proizvoda također imaju utjecaj na tu pojavu. [13]

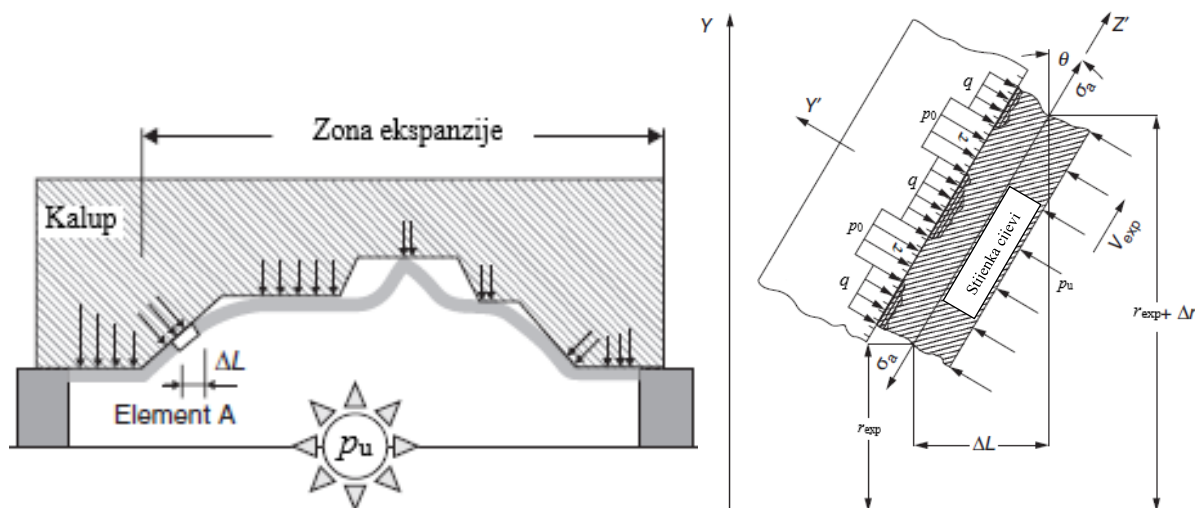
Slika 13a. prikazuje primjer ekspanzijske zone prilikom međusobnog kontakta alata i cijevi zbog djelovanja unutarnjeg tlaka p_u .

Na slici 13b. prikazan je diferencijalni element gdje na stijenku cijevi djeluje tlak maziva q , kontaktni tlak p_0 , unutarnji tlak p_u i aksijalna komponenta naprezanja σ_a . Promatrajući diferencijalni element gdje su džepovi unutar površinskih mikroneravnina cijevi u neposrednoj blizini kontaktnog područja alata i cijevi prema [13] može se zaključiti sljedeće:

- Dodirom površinskih neravnina alata i cijevi određeni postotak čestica maziva bit će istisnut iz džepova neravnina.

- Pod utjecajem vlačnog naprezanja σ_a na element cijevi povećat će se mikro džepovi za čestice maziva
- Doći će do smanjenja relativne brzine klizanja između cijevi i kalupa V_{exp} zbog promjene trenutnog radijusa ekspandirajuće cijevi Δr

Uzimajući u obzir navedeno može se zaključiti da nema nastanka hidrodinamičkog podmazivanja u ekspanzijskoj zoni. Eksperimentalnim pokusima također je dokazano da su maziva na temelju prevlaka učinkovitija od tekućih u ovoj zoni hidrooblikovanja. [13]



Slika 13. Rubni uvjeti u zoni ekspanzije (a) i diferencijalni element A (b) [13]

2.5. Maziva u procesu hidrooblikovanja

Radni fluid korišten u procesu hidrooblikovanja je voda s dodatkom 5-10 % ulja i ostalih aditiva u svrhu zaštite protiv korozije i bakterija. Postoji nekoliko vrsta ulja koja se dodaju za optimalna svojstva radnog medija, međutim najbolje karakteristike postižu se upotrebom sintetički baziranih ulja koja osiguravaju visoku otpornost na nečistoće i miješanje s hidrauličnim uljem koje može curiti iz alata pa je tako potrebno manje eventualnih ispiranja sustava odnosno postiže se kraće vrijeme zastoja stroja. [3] Maziva se primarno koriste kako bi se smanjilo trenje između sirovog materijala i alata i produžio životni vijek istog. Najčešće korištena maziva su suhe prevlake, paste i uljne prevlake. [3]

Tvrtka Precision Fluids osnovana 1992. godine u Texasu specijalizirana je za proizvodnju i prodaju svih vrsta ulja i maziva u području oblikovanja materijala deformiranjem. U širokom asortimanu proizvoda primjer paste za podmazivanje cijevi je Hydroform P 3190 dizajniran za visokotlačno hidrooblikovanje cijevi. Nanosi se na površinu cijevi sprejem ili kistom. Lako se nanosi i odstranjuje s površina alata i proizvoda. Primjer suhe prevlake je Hydroform DF 3192 koje se nanosi na cijev te nakon sušenja ostavlja suhu prevlaku koja služi kao zaštitni sloj između alata i cijevi. [14]

Maziva koja se koriste prilikom procesa hidrooblikovanja prema [13] moraju zadovoljiti nekoliko navedenih funkcija:

- Redukcija trenja između dodira alata i priprema
 - Niža razina trenja smanjuje sile i snagu preše potrebnu za izvođenje procesa, također se postiže ravnomjernija deformacija.
- Razdjeljivanje tarnih površina i mogućnost brze prilagodbe prilikom generiranja novih površina
 - Mazivo bi trebalo spriječiti direktan kontakt materijala te prilikom generiranja novih površina formirati film odnosno barijeru između površina materijala alata i priprema.
- Prilagodljivost različitim uvjetima procesa
 - Tijekom procesa mijenjaju se parametri kao što su brzina klizanja, tlak, temperatura i deformacija materijala zbog različitih stupnjeva deformacije odnosno vrijednosti tlaka i aksijalnog posmaka cijevi.
- Kemijska i metalurška kompatibilnost odnosno inertnost s materijalom priprema i alata
 - Mazivo mora biti postojano na različitim temperaturama, antikorozivno prema materijalima alata i priprema i ne smije izazvati kemijske i metalurške promjene proizvoda ili alata.
- Dobra kvaliteta površine proizvoda, nizak stupanj trošenja alata
- Jednostavna primjena i odstranjivanje
 - Mazivo mora biti prihvatljivo za okoliš, ne smije izazivati iritaciju kože niti biti otrovno. Nanošenje i odstranjivanje s površina mora biti jednostavno.

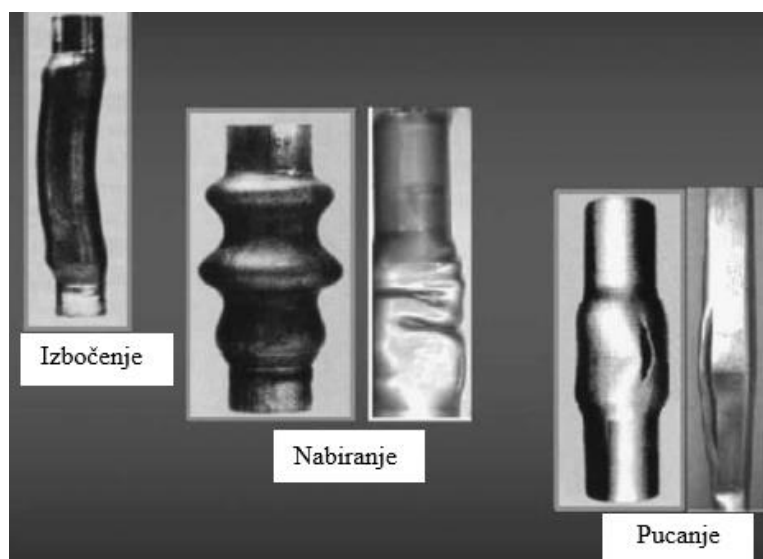
2.6. Tribološke pogreške u procesu hidrooblikovanja cijevi

Pogreške koje su najčešće prisutne u procesu hidrooblikovanja cijevi prikazane su na slici 14. te se mogu prema [15] kategorizirati u nekoliko skupina:

- Nabiranje
- Izbočenje, udubljenje
- Pucanje
- Nezadovoljavajuća kvaliteta površine proizvoda

Njihov uzrok povezan je s nepostizanjem optimalne kombinacije varijabli uključujući karakteristike deformacije materijala, tribološke uvjete, prirast deformacije odnosno iznos

povećanja tlaka u vremenu. Neadekvatno podmazivanje i maziva će izazvati prekomjerno trenje što će također rezultirati navedenim pogreškama. [13]



Slika 14. Najčešće pogreške prilikom procesa hidrooblikovanja [15]

2.7. Prednosti i nedostaci procesa hidrooblikovanja cijevi

Prema [16], prednosti hidrooblikovanja cijevi su:

1. Visoka dimenzijska točnost i kvaliteta odnosno hrapavost površine
2. Mogućnost izrade proizvoda kompleksne geometrije jednim alatom bez dodatnih operacija zavarivanja i uz manji postotak otpada materijala.
3. Manja masa zbog redukcije volumena materijala odnosno tanje stijenke materijala uz zadržanu ili veću strukturnu čvrstoću i krutost
4. Potrebno je manje operacija za izradu proizvoda
5. Manji troškovi alata

Također postoje i određeni nedostaci kao što su duže vrijeme ciklusa i visoka početna investicija u usporedbi s procesom prešanja. Hidrooblikovanje cijevi jeftiniji je postupak samo ako završni proizvod zahtijeva veću količinu materijala, opreme za izradu i sastavljanje, velik udio rada u smislu izrade zavarenih sklopova koji zahtijevaju nekoliko operacija prešanja. Međutim ako se jedan postupak prešanja zamjenjuje procesom hidrooblikovanja cijena izrade proizvoda vjerojatno će porasti. [16]

Hidrooblikovanje cijevi posebno je zastupljeno u izradi dijelova za automobile, bicikle, motocikle, komponente za sanitarnu upotrebu i kućanske uređaje. Tipični proizvodi izrađeni postupkom hidrooblikovanja cijevi su dijelovi ovjesa automobila, šasije, ispušni sustavi motornih vozila, okviri bicikala, katalizatori, kućišta za amortizere i razne cijevi. Na slici 15. prikazan je hidrooblikovani okvir bicikla tvrtke Mokumono Bicycles. Slika 16. prikazuje

hidrooblikovani okvir šasijske automobila, a na slici 17. prikazan je hidrooblikovani stražnji okvir s ostalim komponentama modela Mazda MX-5 Roadster.



Slika 15. Hidrooblikovani okvir bicikla [17]



Slika 16. Hidrooblikovani okvir šasijske [18]



Slika 17. Hidrooblikovani stražnji okvir s ostalim komponentama modela Mazda MX-5 Roadster [19]

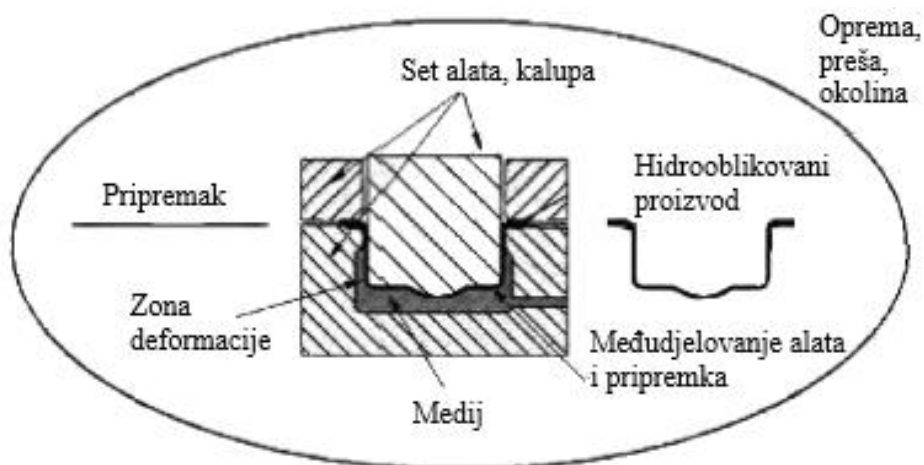
3. HIDROOBLIKOVANJE LIMOVA

Hidrooblikovanje limova u početku nije bilo zastupljeno previše u autoindustriji zbog visokih vremena ciklusa izrade proizvoda. Kontinuirani razvoj hidraulike, dizajna preša, alata i kontrola u proteklih dvadesetak godina doveo je do značajnog smanjenja vremena ciklusa što je privuklo pažnju autoindustrije. Primjer toga je tvrtka General Motors koja je kupila prešu za hidrooblikovanje od Amino korporacije u Japanu za komercijalnu proizvodnju modela Pontiac Solstice. [20]

Hidrooblikovanje lima prema [20] odlikuje:

- Niska cijena alata
- Poboljšana svojstva proizvoda nakon deformiranja kao što su otpornost na udubljenja i povećana mogućnost apsorpcije energije.
- Visoka kvaliteta završne površine zbog toga što nema kontakta metal na metal u procesu izrade.

Hidrooblikovanje limova je proces oblikovanja metala pri kojem se koristi visoki tlak hidrauličkog fluida u tlačnoj komori kako bi se površina lima oblikovala pomoću jednog alata. Ovim procesom moguće je izraditi širok raspon proizvoda od jednostavnih do složenih geometrijskih oblika uključujući razne vrste materijala kao što su aluminij, čelik, nehrđajući čelik, titan, inkonel, bakar te razni kompoziti. Pojednostavljene komponente sustava za hidrooblikovanje limova prikazane su na slici 18.



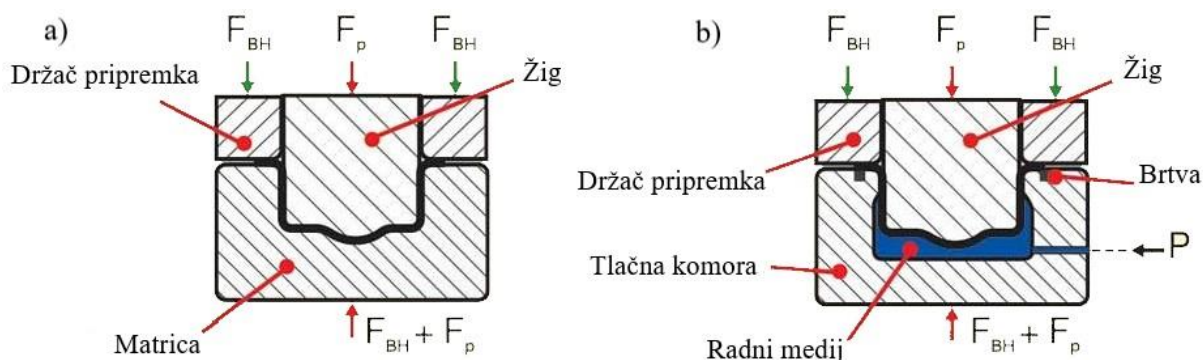
Slika 18. Komponente sustava za hidrooblikovanje limova [12]

3.1. Hidrooblikovanje limova pomoću žiga

Hidrooblikovanje limova pomoću žiga noviji je postupak deformacije materijala koji kombinira postupke hidrooblikovanja i dubokog vučenja te je najčešće korišten u automobilskoj i avionskoj industriji. Slika 19. prikazuje razliku između klasične operacije dubokog vučenja i hidrooblikovanja pomoću žiga gdje se pripremak duboko vuči i suprotstavlja suprotnom pritisku tlačne komore umjesto matrice u standardnoj operaciji dubokog vučenja. Medij u tlačnoj komori može biti pasivan što znači da je tlak generiran tijekom radnog hoda žiga zbog nestlačivosti medija ili aktivan kada je tlak generiran pomoću vanjske pumpe. [20]

Tijekom ovog procesa tlak fluida na pripremak povećava sile trenja na mjestima međudjelovanja alata i pripremkama što sprječava deformirajući komad lima da kliže preko površine žiga. Prema tome, istezanje koje se događa prilikom dubokog vučenja većim dijelom je eliminirano čime se postiže ravnomjernija debljina stijenke proizvoda. Koeficijent redukcije je također veći u slučaju hidrooblikovanja pomoću žiga reducirajući time broj faza dubokog vučenja kod izrade proizvoda zahtjevne geometrije. Suprotni pritisak također pomaže spriječiti nabiranje materijala na bočnoj stijenci proizvoda. [21]

Dizajn alata sličan je alatima koji se koriste kod standardnog procesa vučenja. Žig i držač pripremkama dizajnirani su prema obliku završnog proizvoda, dok je matrica zamijenjena tlačnom komorom koja se nalazi u donjem dijelu alata. Tlačna komora sa svim dijelovima koji su u kontaktu s pripremkom mora biti zabrtvljena u svrhu sprečavanja curenja fluida pod tlakom tijekom procesa. Vrijednost tlaka koji je potreban da se pripremak u potpunosti formira u završni proizvod ovisi isključivo o najmanjem radijusu geometrije proizvoda.



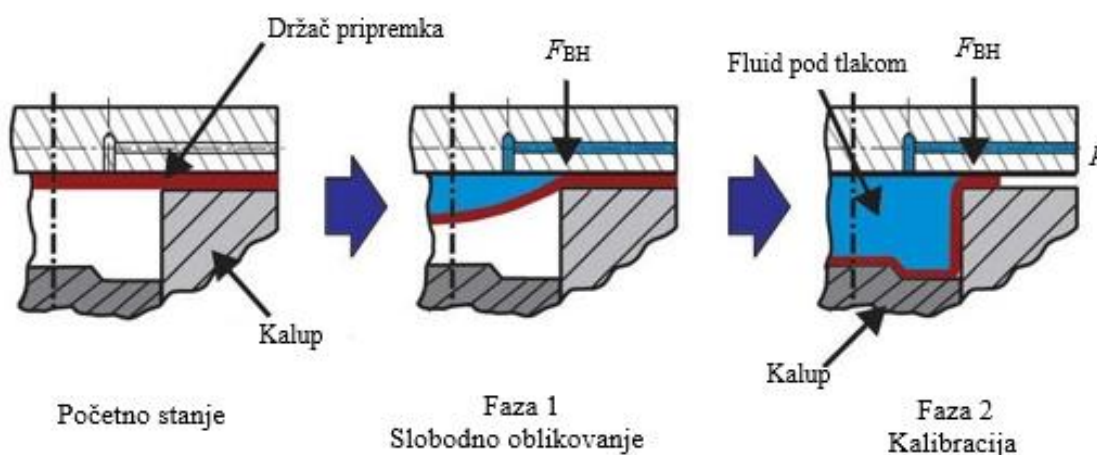
Slika 19. Usporedba procesa dubokog vučenja (a) i hidrooblikovanja žigom (b) [21]

3.2. Hidrooblikovanje limova pomoću kalupa

Kod ovog postupka pripremak se oblikuje po obliku kalupa pomoću tlaka fluida. Prema slici 20. proces oblikovanja može se podijeliti u dvije faze. Prva faza uključuje slobodno oblikovanje, gdje se pripremak počinje slobodno oblikovati pod utjecajem tlaka fluida sve dok ne započne kontakt sa stijenkom kalupa. Druga faza uključuje kalibraciju odnosno prijanjanje pripremkama na oblik kalupne šupljine zbog visokog tlaka medija pri čemu on dobiva završni željeni oblik. Razina potrebnog tlaka fluida ovisi o vrsti, debljini materijala, složenosti geometrije proizvoda i najmanjem radijusu geometrije kalupa. [10]

Slobodno oblikovanje u prvoj fazi karakterizira uniformna raspodjela deformacije lima, poboljšava se otpornost na udubljenja. Također je smanjena mogućnost napuknuća lima što se može dogoditi zbog lokalnih deformacija. [10]

Tijekom procesa oblikovanja držač pripremkama kontrolira formiranje materijala u kalupnu šupljinu te ima zadaću brtvljenja kako bi se spriječilo curenje fluida pod tlakom. Dvije bitne veličine ovog procesa su tlak u tlačnoj komori i sila držanja pripremkama. Njihov iznos potrebno je pažljivo odabrati i korigirati kako bi se održala optimalna deformabilnost materijala što ovisi o geometriji proizvoda. [12]



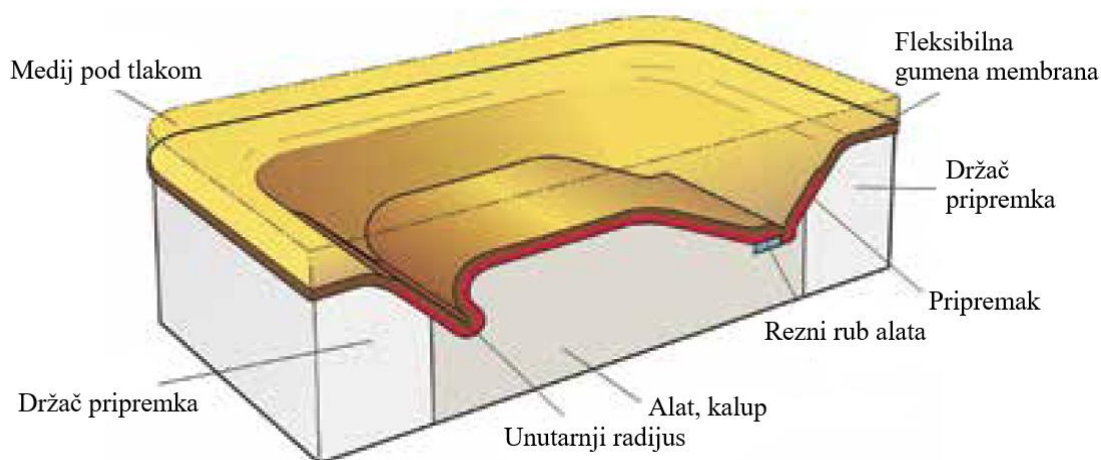
Slika 20. Faze hidrooblikovanja lima pomoću kalupa [10]

3.3. Hidrooblikovanje limova – različiti postupci procesa

3.3.1. Hidrooblikovanje lima s membranom

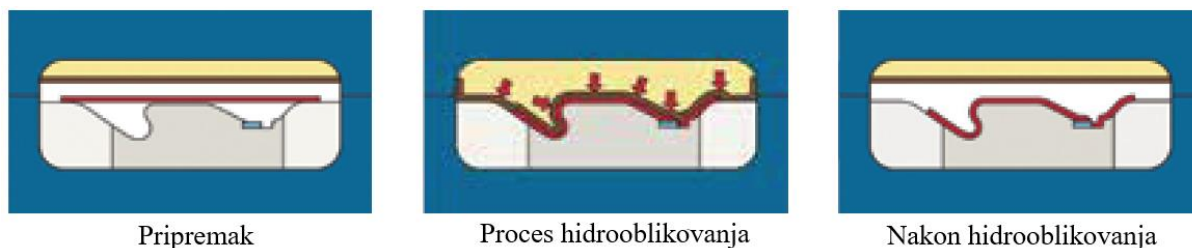
Shematski prikaz hidrooblikovanja pomoću membrane prikazan je na slici 21. Pripremak je pozicioniran na krutom donjem dijelu alata, koji ujedno definira oblik gotovog proizvoda. Gornji dio preše se pomiče prema dolje dok su kalupna šupljina, pripremak i prsten za pridržavanje lima stacionarni. Stlačeni medij odnosno ulje se ubrizgava odozgo i pomoću fleksibilne gumene membrane pripremak se deformira prema obliku kalupa. Visoke uniformne vrijednosti pritiska ulja osiguravaju preciznu izradu proizvoda sa zadovoljavajućim

tolerancijama uz mogućnosti izrade unutarnjih radijusa i oštih bridova. Nakon dekompresije gotovi proizvod se vadi iz preše. [12]



Slika 21. Shematski prikaz hidrooblikovanja pomoću membrane [22]

Slika 22. prikazuje proizvod u raznim fazama hidrooblikovanja pomoću membrane od pozicioniranja početnog pripremkama na držać, primjene tlaka na komad lima i promjene njegovog oblika prema konturi kalupa u završni proizvod.

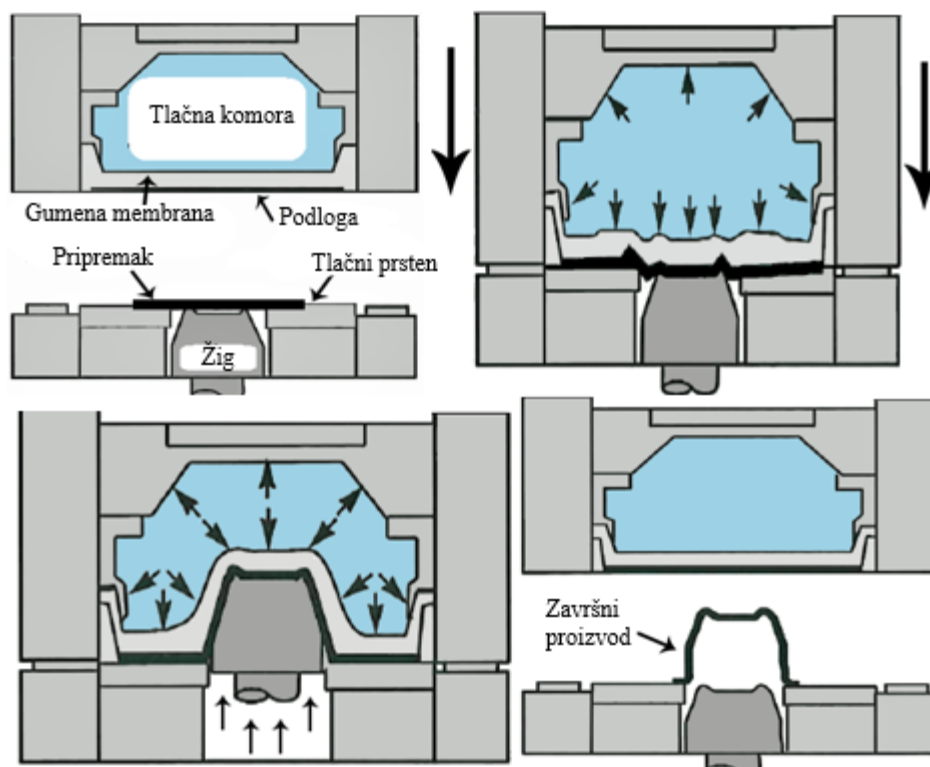


Slika 22. Proizvod u raznim fazama hidrooblikovanja [22]

Princip hidrooblikovanja lima s fleksibilnom gumenom membranom i žigom prikazani su na slici 23. Glavne komponente preše su tlačna komora smještena u gornjem dijelu stroja koja sadrži fluid pod tlakom, žig smješten u donjem dijelu preše povezan s hidrauličkim cilindrom te tlačni prsten čija je zadaća osiguravanje sile držanja pripremkama kako ne bi došlo do njegovog pomicanja u procesu hidrooblikovanja. [23]

Početak procesa kreće postavljanjem pripremkama koji je prekriven mazivom na donji tlačni prsten. Ako je potrebno, na pripremak se stavlja podloga kako ne bi došlo do oštećenja fleksibilne gumene membrane. Zatvaranje preše počinje gibanjem tlačne komore s gumenom membranom na površinu sirovca. Fluid unutar komore potom se tlači na potrebnu vrijednost tlaka u koordinaciji sa žigom koji je pričvršćen na hidraulički klip i držać pripremkama odnosno tlačni prsten. Hodom žiga u tlačnu komoru ostvaruje se dodatna sila oblikovanja na radni komad i tako se vrši proces vučenja. Kontrolni ventil regulira protok fluida održavajući tako potreban

tlak. Dolaskom žiga u krajnji položaj radni komad poprima svoj završni oblik, tlačna komora se dekompresira, žig i tlačna komora vraćaju se u početan položaj, radni komad ostaje na držaču te se vadi iz stroja. [23]

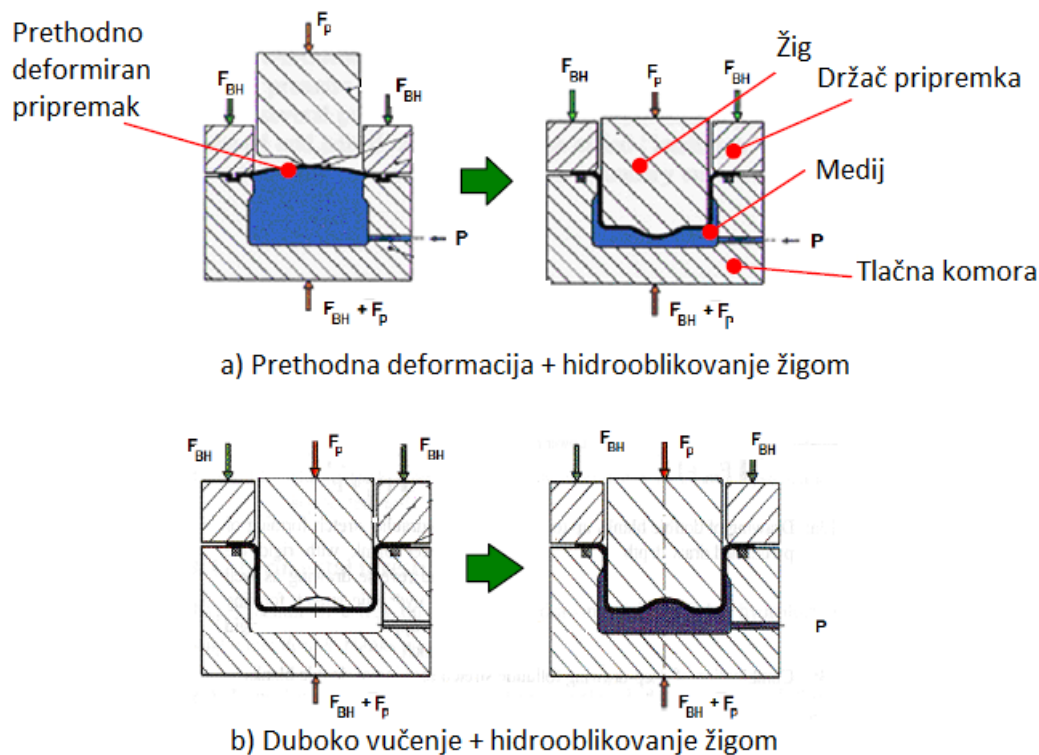


Slika 23. Proces hidrooblikovanja lima s membranom [23]

Ovim postupkom se dobiva se veći koeficijent redukcije i vrlo malo stanjivanje bočne stijenke proizvoda, također je moguće izraditi nesimetrične proizvode kao što su razni automobilski okviri, spremnici goriva, limenke, sudoperi te razne posude.

3.3.2. Kombinacija hidrooblikovanja žigom s postupcima prešanja

U ovom “aktivnom” procesu hidrooblikovanja žigom prikazanom na slici 24. vanjska pumpa generira pritisak tlačne komore. Pripremak je prethodno deformiran u suprotnom smjeru od radnog hoda žiga pomoću tlačne komore prije nego je započeo process hidrooblikovanja žigom. Takav postupak omogućuje stvaranje plastične deformacije i optimalnu raspodjelu naprezanja što će rezultirati višom otpornošću na udubljenja. Također je ovim postupkom eliminirana pojava nabora na proizvodu uz uniformniju raspodjelu debljine stijenke time povećavajući koeficijent redukcije prilikom vučenja. Kombinacija dubokog vučenja i hidrooblikovanja žigom rezultira smanjenjem potrebnih stupnjeva oblikovanja prilikom izrade dijelova kompleksne geometrije s različitim izbočenjima. [12]

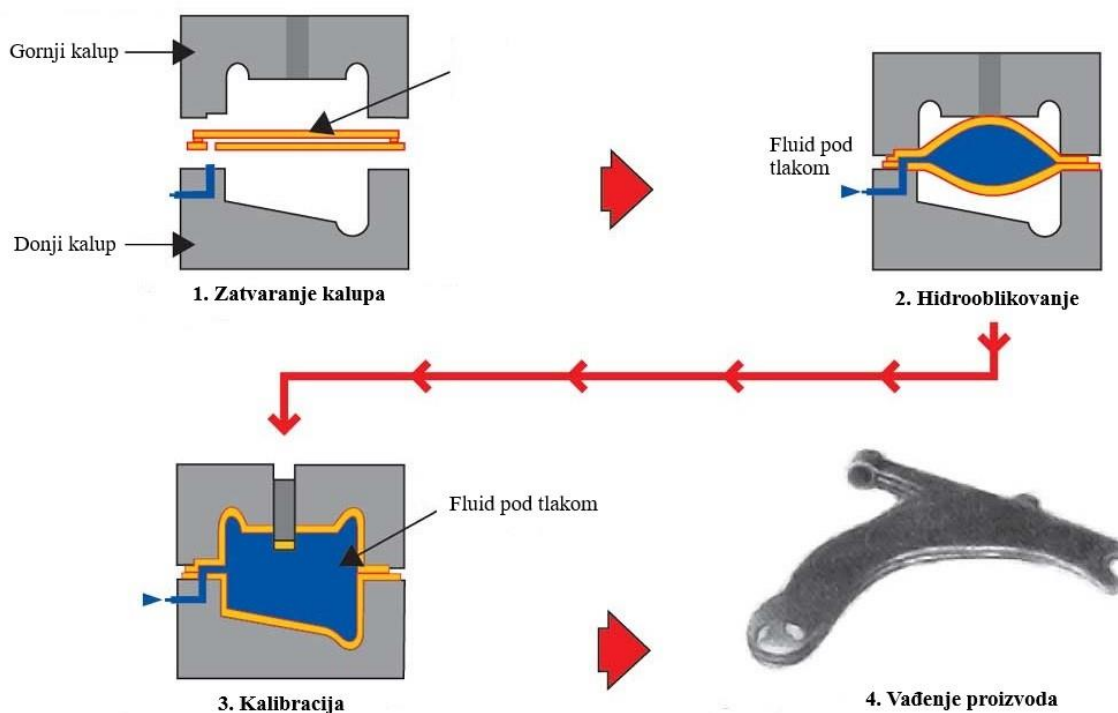


Slika 24. Kombinacija procesa hidrooblikovanja žigom i klasičnih postupaka oblikovanja [21]

3.3.3. Hidrooblikovanje dvostrukih limova

U ovom postupku oblikovanja pripremak se sastoji od dvije limene ploče različitih oblika koje su najčešće zavarene po rubovima ploča, te se ostavlja prostor koji nije zavaren, a služi za ubrizgavanje fluida pod tlakom. Fluid koji se najčešće koristi je ulje. [12]

Limovi odnosno pripreмки mogu biti različitih debljina, vrsta materijala i mehaničkih svojstava. Shematski prikaz hidrooblikovanja dvostrukih limova prikazan je na slici 25. i sastoji se od nekoliko faza. Pripremak se stavlja u alat koji se sastoji od gornjeg i donjeg kalupa koji je izrađen prema obliku i geometriji završnog proizvoda. Pripremak se pridržava na rubovima te se potom fluid pod tlakom ubrizgava unutar limova pomoću specijalnog mehanizma. Limovi se pod pritiskom fluida deformiraju te poprimaju oblik kalupa. Potom se vrši kalibracija sa završnim pritiskom fluida pri čemu pripremak dobiva oblik finalnog proizvoda. Proizvod se tada slobodno može izvaditi iz kalupa. [12]



Slika 25. Shematski prikaz hidrooblikovanja dvostrukih limova [10]

Hidrooblikovanje dvostrukih limova alternativa je hidrooblikovanju cijevi u oblikovanju kompleksnih geometrija koje imaju različite presjeke po duljini proizvoda s velikom razlikom u omjeru ekspanzije. [10]

Prilikom hidrooblikovanja cijevi maksimalna postiziva razlika u omjeru ekspanzije u različitim presjecima proizvoda je limitirana zato što je pripremak odnosno cijev jednolikog poprečnog presjeka po duljini odnosno promjera. Prilikom hidrooblikovanja dvostrukih limova mijenjajući širinu lima, mogu se postići poprečni presjeci s različitim omjerom ekspanzije. Ovim postupkom najčešće se izrađuju dijelovi za automobilsku industriju kao što su rezervoari različitih oblika prikazani na slici 26. i B stup automobila Ford Fusion 2013. prikazan na slici 27. [10]



Slika 26. Hidrooblikovani rezervoar goriva [24]



Slika 27. Hidrooblikovani B stup automobila Ford Fusion 2013 [25]

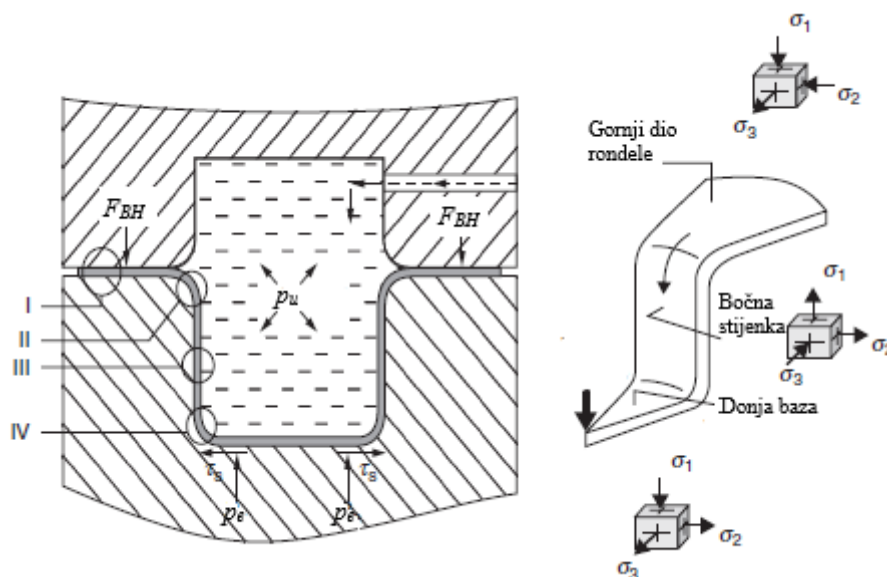
3.4. Zone trenja kod hidrooblikovanja limova

Razumijevanje triboloških uvjeta vrlo je važno kod hidrooblikovanja jer tribološki faktori imaju ključan utjecaj na sam proces obrade i kvalitetu završnog proizvoda. Shematski prikaz međudjelovanja alata i pripremk uz pripadajuće varijable procesa i zone trenja prikazan je na slici 28.

Varijable procesa su:

- p_u – Unutarnji tlak
- p_e – Tlak prilikom međudjelovanja alata i pripremk
- τ_s – Tangencijalno naprezanje
- F_{BH} – Sila držanja pripremk

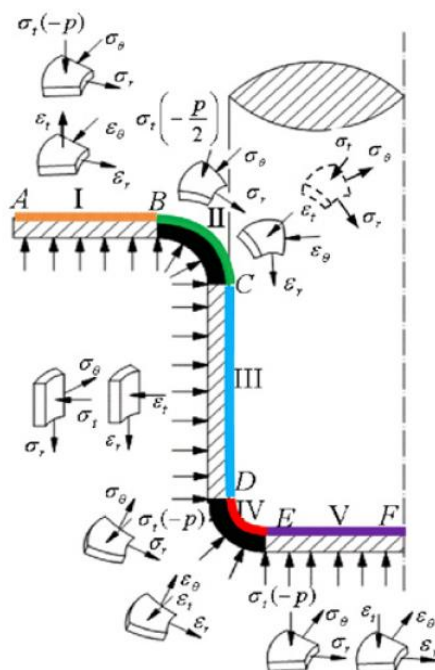
U prvoj zoni trenja tlak fluida p uzrokuje utiskivanje pripremk u kalupnu šupljinu prilikom čega postoje tri normalna naprezanja od kojih su σ_1 i σ_2 tlačna dok je σ_3 tlačno naprezanje. U drugoj zoni trenja materijal je podvrgnut naprezanju savijanja te počinje poprimiti oblik kalupa. U trećoj zoni trenja prisutno je vlačno i tlačno naprezanje u smjeru stanjenja stijenke što je uzrokovano tlakom fluida p . U četvrtoj zoni trenja također je dominantno naprezanje na savijanje. Za razliku od postupka dubokog vučenja gdje je opterećen žig koji utiskivanjem u materijal vrši njegovu deformaciju kod hidrooblikovanja limova naprezanja djeluju na stijenke kalupne šupljine. [13]



Slika 28. Shematski prikaz međudjelovanja alata i priprema uz pripadajuće varijable procesa i zone trenja [13]

3.5. Stanje napreznosti i deformacija kod hidrooblikovanja pomoću žiga

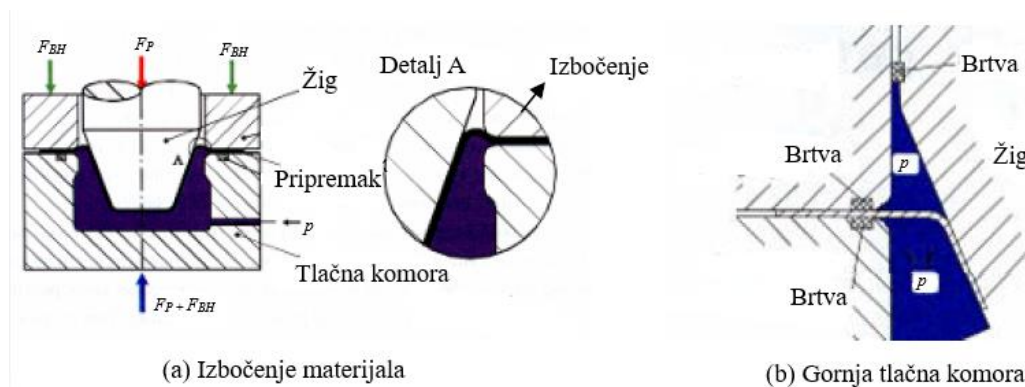
Tipične zone deformacije kod hidrooblikovanja pomoću žiga s pripadajućim napreznostima i deformacijama prikazane su na slici 29. Površina deformirajuće rondele podijeljena je na pet zona deformacije. Prema [26], odnos između napreznosti i deformacija je konstantan odnosno za $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ vrijedi da je $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$. Prva zona deformacije definirana je područjem AB , te je u njoj ronđela pritisnuta pomoću tlačnog prstena. U ovoj zoni za glavna napreznostija vrijedi da je $\sigma_1 = \sigma_r > 0$, $\sigma_2 = \sigma_t < 0$ i $\sigma_3 = \sigma_\theta < 0$. Prema tome stanje deformacija glasi: $\varepsilon_1 = \varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_t > 0$ i $\varepsilon_3 = \varepsilon_\theta < 0$. Druga zona je tranzicijska zona gdje rub ronđele poprima oblik matrice pod djelovanjem žiga i suprotstavlja se tlaku fluida u tlačnoj komori, a definirana je područjem BC . Glavna napreznostija blizu točke B imaju jednake vrijednosti kao i u prvoj zoni, dok za odnose deformacija vrijedi da je $\varepsilon_1 = \varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_t < 0$ i $\varepsilon_3 = \varepsilon_\theta < 0$. Za napreznostija u području točke C vrijedi: $\sigma_1 = \sigma_r > 0$, $\sigma_2 = \sigma_\theta < 0$ i $\sigma_3 = \sigma_t < 0$. Stanje deformacija jednako je kao i u području točke B . Treća zona je bočna stijenka proizvoda a definirana je područjem CD . Stanje napreznostija glasi: $\sigma_1 = \sigma_r > 0$, $\sigma_2 = \sigma_\theta = (\sigma_r + \sigma_t)/2$ i $\sigma_3 = \sigma_t < 0$, dok za stanje deformacija vrijedi da je $\varepsilon_1 = \varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_\theta = 0$ i $\varepsilon_3 = \varepsilon_t = \varepsilon_r < 0$. Četvrtu zonu karakterizira radijus žiga a definirana je područjem DE . Stanje napreznostija glasi: $\sigma_1 = \sigma_r > 0$, $\sigma_2 = \sigma_\theta > 0$ i $\sigma_3 = \sigma_t > 0$, dok za stanje deformacija vrijedi da je $\varepsilon_1 = \varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_\theta > 0$ i $\varepsilon_3 = \varepsilon_t < 0$. Peta zona je donja stijenka proizvoda definirana područjem EF . Stanje napreznostija glasi: $\sigma_1 = \sigma_r = \sigma_\theta > 0$, $\sigma_2 = \sigma_\theta = \sigma_r > 0$ i $\sigma_3 = \sigma_t > 0$, dok za stanje deformacija vrijedi da je $\varepsilon_1 = \varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_\theta > 0$ i $\varepsilon_3 = \varepsilon_t < 0$.



Slika 29. Tipične zone deformacije kod hidrooblikovanja pomoću žiga[26]

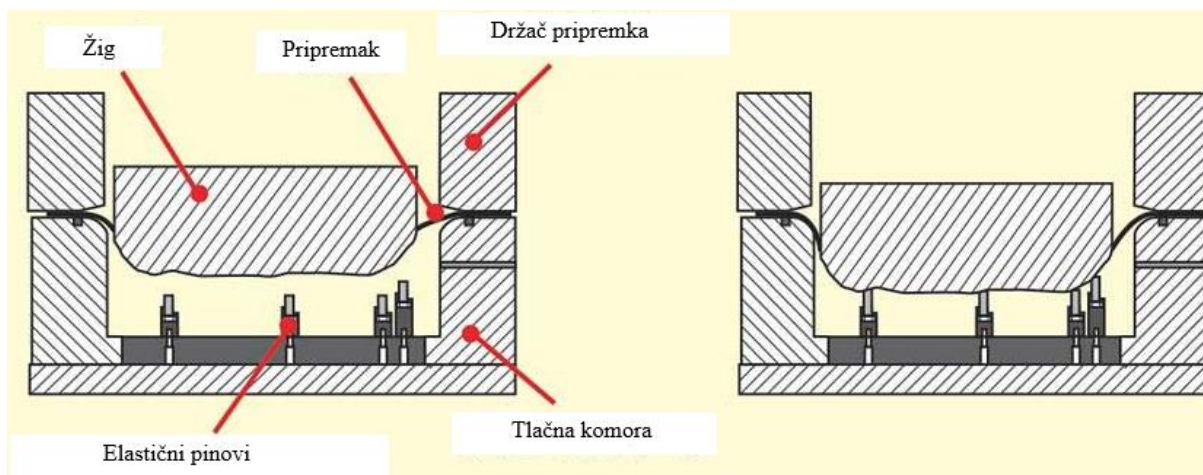
3.6. Tribološke pogreške u procesu hidrooblikovanja limova

Proizvodi koji imaju konusne bočne stijenke a izrađuju se hidrooblikovanjem pomoću žiga najčešće imaju pogreške u obliku izbočenja i udubljenja u praznini između držača priprema i žiga. Razlog tog problema je tlak u tlačnoj komori prilikom hidrooblikovanja. Takva izbočenja mogu dovesti do stanjivanja stijenke proizvoda i fraktura na višim tlakovima u tlačnoj komori. Sveučilište u Stuttgartu razvilo je novi koncept alata prikazan na slici 30. s dodatnim brtvljenjem na području dodira žiga i držača priprema u svrhu stvaranja tlačne komore u tom području. Tijekom procesa hidraulički fluid iz donje tlačne komore cirkulira u gornju tlačnu komoru tako da je tlak jednak u donjoj i gornjoj tlačnoj komori čime se eliminira pojava izbočenja na proizvodu. [27]



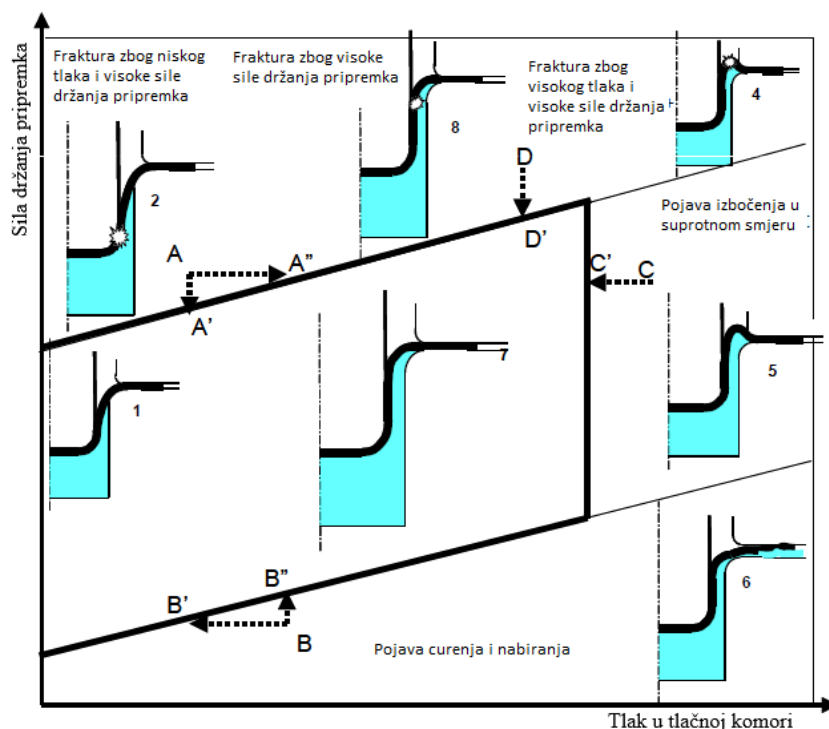
Slika 30. Shematski prikaz izbočenja kod hidrooblikovanja i gornja tlačna komora [27]

Zato što tlak tlačne komore ovisi o najmanjem radijusu proizvoda, kod oštih bridova potreban je visok tlak tlačne komore odnosno preša s visokim kapacitetom što povećava cijenu investicije. Upotrebom elastičnih pinova prikazanih na slici 31. koji su montirani u tlačnoj komori moguće je formiranje oštih bridova mehaničkim putem što omogućuje manji potreban tlak u procesu odnosno kapacitet preše i sniženje cijene investicije. [27]



Slika 31. Shematski prikaze preše s elastičnim pinovima u tlačnoj komori [21]

Procesno područje definirano je kombinacijom parametara za koje se proizvod može oblikovati bez pogrešaka. Slika 32. prikazuje procesno područje definirano silom držanja priprema i tlaka tlačne komore kao dva procesna parametra. Ako je sila držanja priprema premala može doći do pojave nabiranja materijala. Nabiranje na bočnoj stijenci događa se kod konusnog žiga kada je vrijednost tlaka u tlačnoj komori premala. Ako je došlo do stanjenja stijenke zbog visoke sile držanja priprema i/ili nedovoljnog pritiska u tlačnoj komori tada može doći do pojave fraktura što se može izbjeći povećanjem tlaka u tlačnoj komori ili smanjenjem sile držanja priprema. Curenje fluida pod tlakom i izbočenje u suprotnom smjeru od radnog hoda žiga također su greške koje se mogu dogoditi prilikom procesa. Do curenja fluida dolazi kod nedovoljnih sila držanja priprema rezultirajući pojavom nabiranja i curenja medija što ima za posljedicu pad tlaka fluida u komori što također može izazvati pojavu fraktura. Curenje medija može biti spriječeno povećanom silom držanja priprema ili redukcijom tlaka tlačne komore. Brtvljenje se koristi za redukciju mogućnosti curenja fluida. Izbočenje u suprotnom smjeru od radnog hoda žiga dešava se zbog prejakog tlaka fluida najčešće kod proizvoda s konusnom stijenkom i može se spriječiti smanjenjem tlaka u tlačnoj komori. [28]



Slika 32. Procesno područje definirano silom držanja pripreмка i tlaka tlačne komore kod hidrooblikovanja pomoću žiga [28]

Kvaliteta proizvoda izrađenih postupkom hidrooblikovanja pomoću kalupa uvelike ovisi o geometriji proizvoda, procesnim parametrima, svojstvima materijala koji se oblikuje i uvjetima trenja prilikom kontakta alata i komada lima. Među najčešćim pogreškama koje uzrokuju nesukladan proizvod može se izdvojiti pojava napuknuća zbog prevelikog stanjenja stijenke proizvoda, nabiranje materijala i curenje stlačenog medija tijekom hidrooblikovanja. Svaki uspješan ciklus hidrooblikovanja odvija se u određenom procesnom području koje ovisi o geometriji proizvoda a karakterizira ga ciklus proveden bez navedenih pogrešaka. [28]

Slika 33. prikazuje utjecaj različitih parametara na pogreške tijekom hidrooblikovanja. Držać pripreмка koji omogućuje kontrolu pripreмка i radni tlak fluida imaju značajan utjecaj na kvalitetu i točnost proizvoda. Materijal lima je aluminijska legura 2024-0 debljine 1,2 mm. Desno pozicioniran proizvod izrađen je pri radnom tlaku od 100 Mpa pomoću kalupa ali bez držaća pripreмка zbog čega je došlo do nabiranja materijala s bočne strane. Proizvod u sredini izrađen je pri nižem radnom tlaku od 34 Mpa pomoću kalupa i držaća pripreмка ali nije u potpunosti oblikovan prema zadanim specifikacijama niti je odstranjen višak materijala pomoću reznog ruba alata.

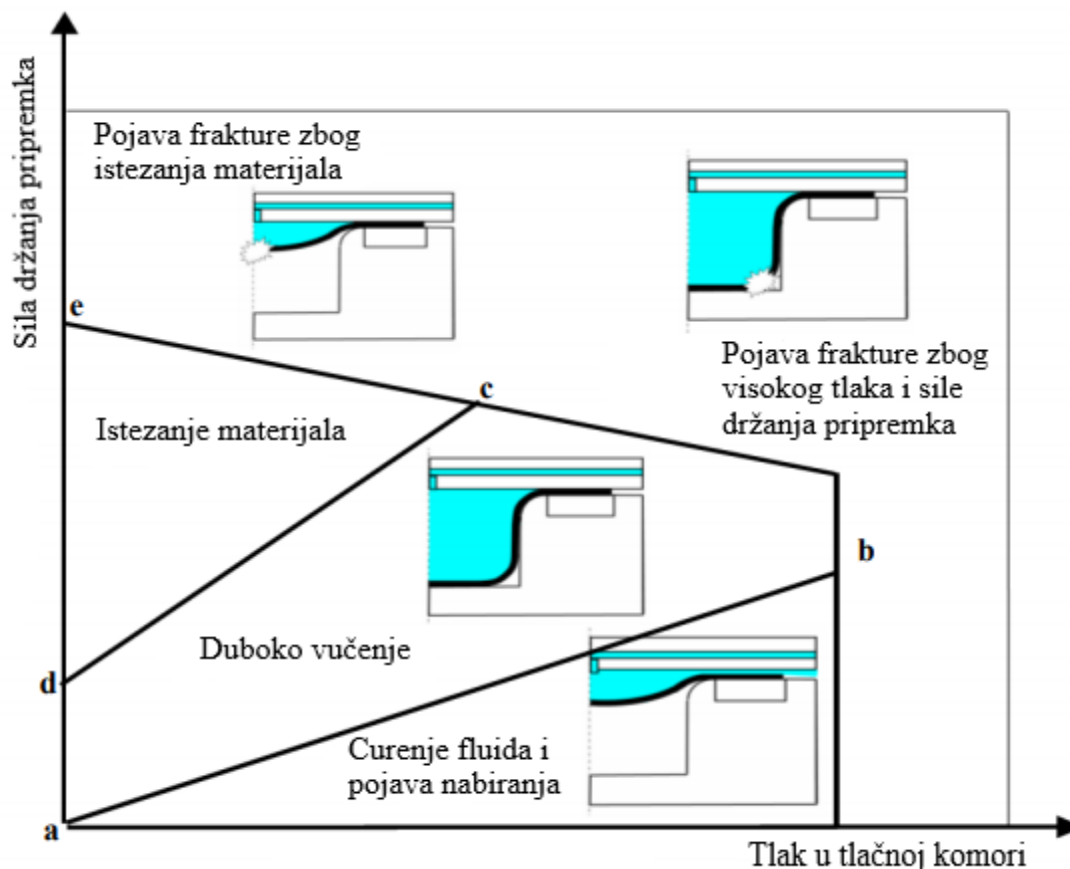
Lijevo pozicioniran proizvod izrađen je pri radnom tlaku od 100 Mpa pomoću kalupa i držača pripremljen, oblikovan je prema zadanim specifikacijama, višak materijala odstranjen je pomoću reznog ruba alata te kao takav predstavlja proizvod zadovoljavajuće kvalitete. [29]



Slika 33. Utjecaj različitih parametara na pogreške tijekom hidrooblikovanja [29]

Slika 34. prikazuje procesno područje definirano silom držanja pripremljenka i tlaka fluida u tlačnoj komori. Nabiranje materijala i curenje medija događa se ako je vrijednost sile držanja pripremljenka preniska. Povećanjem sile ulazi se u područje dubokog vučenja ili istezanja materijala ovisno o zadanim geometrijskim karakteristikama proizvoda. Zona istezanja (*c,d,e*) će se smanjiti kada vrijednosti tlaka medija poraste, jer viši tlak i sila držanja pripremljenka rezultiraju pretjeranim stanjenjem stijenke materijala. Ova zona često je limitirana na niske vrijednosti tlaka medija koje odgovaraju prvoj fazi procesa hidrooblikovanja prije nego što materijal dotakne stijenke kalupa.

Povećanje sile držanja pripremljenka pri niskim vrijednostima tlaka medija u zoni dubokog vučenja (*a,b,c,d*) rezultiralo bi istezanjem materijala. Povećanjem tlaka fluida, povećala bi se i sila držanja pripremljenka te dovela do pogreške odnosno pretjeranog stanjivanja stijenke materijala. Može se zaključiti da je procesno područje ponekad vrlo limitirano što je povezano s razinom složenosti geometrije proizvoda i razinom deformabilnosti te je ponekad potrebno nekoliko pokušaja za utvrđivanje procesnih parametara u svrhu izrade proizvoda zadovoljavajuće kvalitete.



Slika 34. Procesno područje definirano silom držanja pripreмка i tlaka tlačne komore kod hidrooblikovanja pomoću kalupa [28]

3.7. Prednosti i nedostaci hidrooblikovanja

Prema [12], postoje brojne prednosti hidrooblikovanja limova u odnosu na ostale postupke oblikovanja:

1. Bolja oblikovljivost

- Prilikom hidrooblikovanja pomoću žiga tlak fluida stvara visoke sile trenja na pripreмку koje sprečavaju istezanje materijala nakon što dođe u kontakt sa žigom. Prema tome, u usporedbi s operacijom prešanja, stijenka materijala nije toliko istegnuta u procesu hidrooblikovanja što rezultira ravnomjernijom debljinom stijenke i višim koeficijentom redukcije vučenja.
- Slobodna deformacija materijala prilikom hidrooblikovanja pomoću kalupa omogućuje uniformnu raspodjelu opterećenja kroz pripremak. Suprotno tome, kod prešanja u pripreмку nastaju visoke lokalne deformacije na mjestima radijusa žiga.

2. Otpornost na udubljivanje

- Očvršćivanje materijala prilikom istezanja kod hidrooblikovanja pomoću kalupa poboljšava otpornost na udubljivanje u usporedbi s proizvodom izrađenim prešanjem zato što je pripremak tada jako rastegnut odnosno opterećen ispod površine žiga.

3. Niža cijena alata

- Eliminacijom jednog od alata (kalupa ili žiga) smanjuju se troškovi alata uz kraće vrijeme razvoja.

4. Bolja kvaliteta površine

- Eliminacijom nabiranja materijala prilikom hidrooblikovanja limova, zbog suprotnog pritiska fluida dobiva se bolja kvaliteta površine.

5. Manji broj operacija

- Hidrooblikovanje omogućuje izradu proizvoda kompleksne geometrije i oblika što rezultira manjim brojem operacija u usporedbi s konvencionalnim postupcima i manjim troškovima proizvodnje.

6. Viša dimenzijska točnost

- Moguće je postići višu kvalitetu površine jer je vanjska površina lima u kontaktu s fluidom, stoga se smanjuju mogućnosti za oštećenjem proizvoda s alatom.
- Viša dimenzijska točnost ostvariva je za simetrične dijelove jednostavne geometrije.

Prema [12] mogući nedostaci ovog postupka su:

1. Visoko vrijeme ciklusa

2. Potrebno osigurati visoke sile / visoka cijena preše

- Hidrooblikovanje pomoću žiga zahtijeva preše višeg kapaciteta odnosno sile u usporedbi s prešanjem zbog tlačne komore koja se tlakom suprotstavlja žigu. Takve preše su relativno skupe i zahtijevaju visoko kapitalno ulaganje. Ovisno o geometriji dijelova i veličini serije proizvoda viša cijena preše dovodi u pitanje isplativost izrade iako su troškovi alata manji.

4. STROJEVI I ALATI ZA HIDROOBLIKOVANJE

U ovom poglavlju bit će opisan visoko tlačni sustav za hidrooblikovanje čije su glavne komponente prema [3]:

- Hidraulična preša
- Alati za hidrooblikovanje
- Hidraulički sustav pojačivača tlaka fluida i komponente vodenog sustava
- Kontrolni i regulacijski sustav

Zbog pojave visokih tlakova u procesu oblikovanja i potrebe da kalupna šupljina bude zatvorena tijekom procesa strojevi koji se za to koriste su hidraulične preše. Za generiranje visokih tlakova najčešće se koristi sustav pojačivača tlaka. Kako bi se fluid pod visokim tlakom distribuirao do sklopa alata koriste se posebno dizajnirani kontrolni ventili, instalacije i cijevi. [13]

Bitne operacije u postupku hidrooblikovanja kao što su otvaranje i zatvaranje preše, brtvljenje, određivanje razine tlaka radnog medija i ostali procesni zahtjevi kontroliraju se pomoću kontrolne jedinice. Sklop alata mora omogućiti slobodno vađenje gotovog proizvoda nakon završetka hidrooblikovanja. [13]

U postupcima hidrooblikovanja limova dizajn alata ima sličnosti s postupkom prešanja, odnosno najmanji radijus geometrije završnog proizvoda ovisi o raspoloživom maksimalnom tlaku fluida u tlačnoj komori. Prilikom hidrooblikovanja pomoću žiga, držač priprema i žig posebno su dizajnirani prema zadanim dimenzijama proizvoda a tlačna komora je najčešće univerzalna za sve oblike izradaka. Zbog visokih sila potrebnih za brtvljenje prilikom hidrooblikovanja tlačna komora i žig dizajnirani su kako bi izdržali takva opterećenja. [12]

4.1. Hidraulične preše

Hidraulična preša korištena za hidrooblikovanje ima dvije osnovne funkcije. Prva funkcija je ostvariti silu zatvaranja kalupa odnosno održati dvije polovice alata zatvorene čemu se protivi sila generirana prilikom procesa ubrizgavanja medija pod tlakom prilikom izrade proizvoda. Druga funkcija je odvajanje polovica alata odnosno kalupa kako bi se gotov proizvod izvadilo iz alata a priprema ponovno stavio u kalup za novi ciklus hidrooblikovanja. [13]

Postoje razne izvedbe hidrauličnih preša za hidrooblikovanje s velikim rasponom veličina i tlačnih kapaciteta, prema [30] najčešći tipovi preša za hidrooblikovanje su:

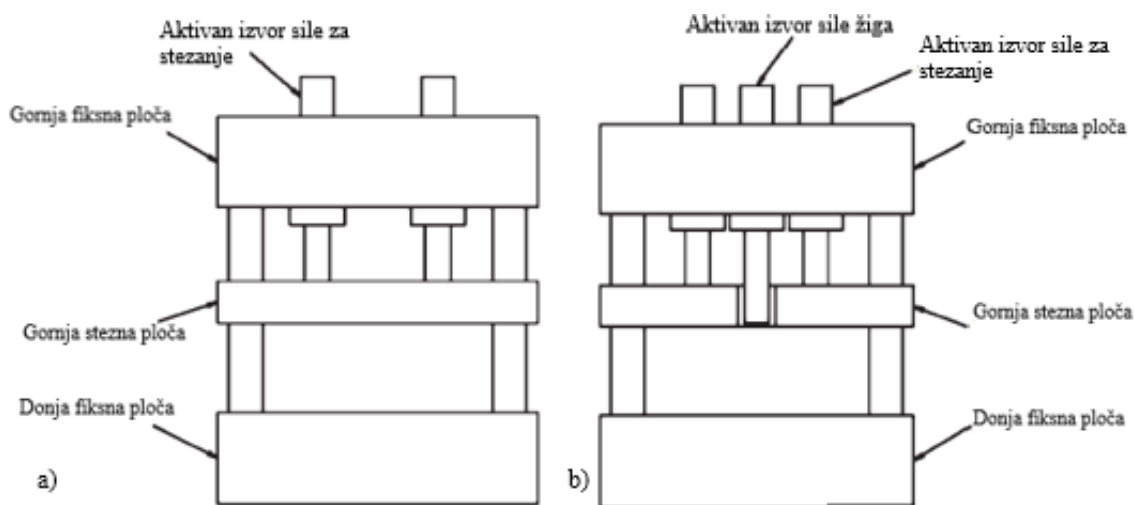
- Jednoradna hidraulična preša
- Dvoradna hidraulična preša
- Hidraulična preša s C okvirom

Jednoradna hidraulična preša pogodna je za hidrooblikovanje cijevi i limova. Postoje izvedbe s dva, tri ili četiri nosiva stupa. Najčešća izvedba preše je s četiri nosiva stupa i radnim hodom prema dolje. To znači da se ovisno o izvedbi, jedan ili više aktivnih izvora sile za stezanje nalaze u gornjoj fiksnoj ploči i glavni smjer gibanja koje proizvode je prema donjem kalupu odnosno donjoj polovici alata. Jednoradna hidraulična preša ima jednu os gibanja koja se primarno koristi za otvaranje, zatvaranje preše i primjenu određene sile stezanja za proces hidrooblikovanja. [13]

Dvoradna hidraulična preša sastoji se od dva aktivna izvora sile koji imaju radni hod u istom smjeru i montirani su u gornju fiksnu ploču. Jednoradna hidraulična preša najčešće se koristi za hidrooblikovanje cijevi dok je upotreba dvoradne preše češća u hidrooblikovanju limova. Primarna os korištena je za primjenu sile stezanja na rubne dijelove lima dok se sekundarna os koristi ako proizvod zahtijeva operaciju prosijecanja za izradu provrta. [13]

Karakteristika preše u obliku C okvira je pristupačnost s tri strane odnosno 270 stupnjeva. Najčešće se koriste za izradu dužih strukturnih dijelova. Stolovi preše mogu se izvući za potrebe umetanja i vađenja proizvoda. [30]

Shema jednoradne i dvoradne hidraulične preše s 4 nosiva stupa prikazana je na slici 35. Osnovne komponente obje preše su fiksna donja ploča, gornja fiksna ploča, gibajuća gornja stezna ploča, aktivni izvori sile, izvor napajanja za hidrauliku i električni kontrolni sustav.

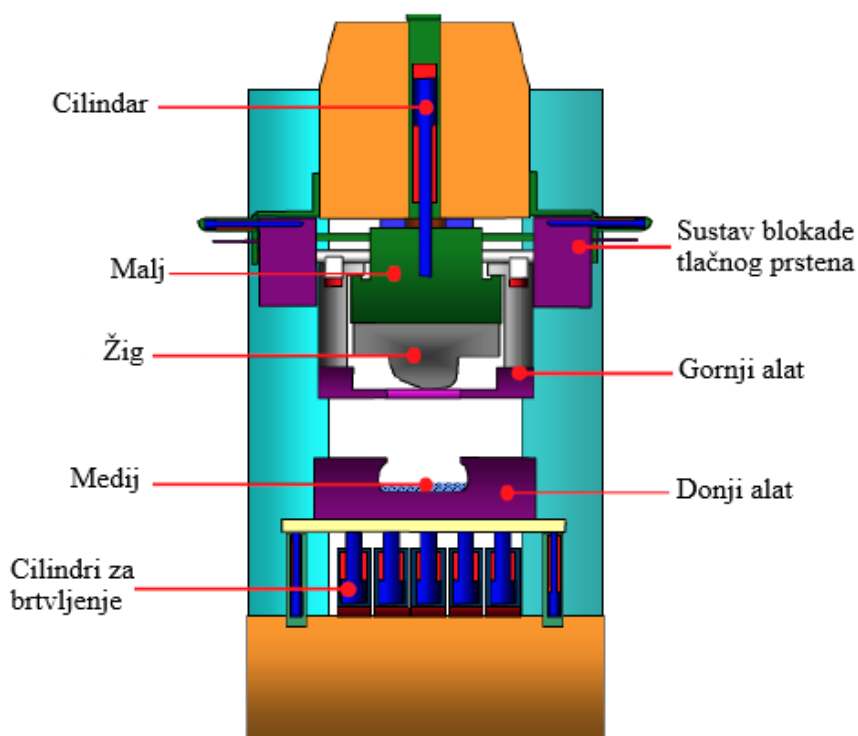


Slika 35. Shema jednoradne (a), i dvoradne hidraulične preše (b) [13]

4.2. Preše za hidrooblikovanje pomoću žiga

Preše korištene za hidrooblikovanje pomoću žiga osiguravaju visoke sile pritiska malja i imaju tlačnu komoru sa suprotne strane. Presjek takve preše prikazan je na slici 36. Moderne preše za hidrooblikovanje imaju cilindre s dužim hodom koji mogu postići veće brzine gibanja kako bi se skratilo vrijeme izrade proizvoda. [12]

Početak ciklusa karakterizira punjenje tlačne komore s fluidom i umetanje priprema u obliku metalnog lima u prešu te njegovo učvršćenje pomoću tlačnog prstena. Cilindri koji služe za učvršćenje lima zajedno s kratkohodnim cilindrima koji su pozicionirani ispod stola preše a služe za zatvaranje i brtvljenje kalupa postaju aktivni čime se ostvaruje sila držanja priprema. Prvu fazu hidrooblikovanja karakterizira gibanje žiga u donju mrtvu točku. Nakon što malj dođe do završetka hoda, dva horizontalno gibajuća cilindra se aktiviraju za uključivanje sustava fiksiranja. Nakon što je pozicija malja fiksirana kreće druga faza hidrooblikovanja gdje se aktiviraju kratkohodni cilindri koji pomiču stol preše i mehanizam za učvršćenje priprema u suprotnom smjeru od gibanja žiga deformirajući time lim na završnu dubinu prema specifikacijama proizvoda. Povećanjem tlaka u tlačnoj komori proizvod je u potpunosti hidrooblikovan. Nakon dekompresije tlačne komore stol preše se spušta na prvobitnu visinu pomoću kratkohodnih cilindara, žig se zajedno s držačem priprema giba u svoj početni položaj tako da se završena komponenta prikazana na slici 37. može nesmetano izvaditi iz stroja. [31]



Slika 36. Shematski prikaz preše za hidrooblikovanje pomoću žiga [31]

Preša je također opremljena s višespojnim sustavom jastuka koji omogućuje promjenu sile držanja pripremkama tijekom procesa hidrooblikovanja. Promjena sile izvodi se pomoću nekoliko cilindara smještenih ispod tlačne komore. Glavna zadaća sustava je nadzor i kalibracija lokalnog pritiska kako bi se postigao optimalan tok materijala i smanjilo curenje fluida pod tlakom. Kada je vrijednost tlaka na cilindru povećana, povećava se i sila držanja pripremkama i manje materijala teče u kalup. Suprotno tome, kada se tlak cilindra smanji više materijala teče u kalup. [32]

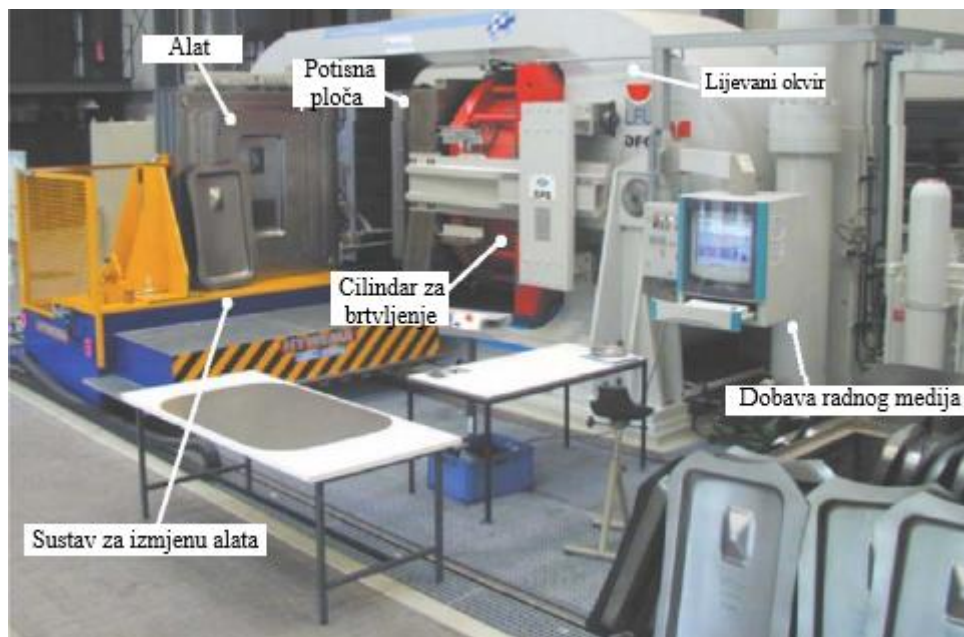


Slika 37. Vađenje proizvoda nakon završetka ciklusa hidrooblikovanja [31]

4.2.1. Preše za hidrooblikovanje pomoću kalupa

Preše za hidrooblikovanje pomoću kalupa zahtijevaju visoke sile brtvljenja zbog velike površine pripremkama što zahtijeva odgovarajući mehanizam koji osigurava stezanje pripremkama. Sveučilište u Dortmundu u suradnji s tvrtkom Siempelkamp izgradili su horizontalnu 10000 tonsku prešu za hidrooblikovanje komponenti većih dimenzija prikazanu na slici 38. Okvir preše izrađen je lijevanjem i pojačan armaturom kako bi izdržala sva opterećenja koja se pojavljuju prilikom procesa hidrooblikovanja. Zbog svoje horizontalne izvedbe preša je relativno jeftina i kompaktnog dizajna jer ne zahtijeva duboke temelje, također koristi kratkohodni cilindar zbog redukcije vremena ciklusa. Prednost horizontalnog dizajna je mogućnost jednostavnog ispuštanja stlačenog medija. [10]

Kako bi se smanjila cijena stroja hidraulični sustav preše omogućuje dvije razine tlaka. Tijekom ciklusa izrade proizvoda potreban je veći volumen fluida i relativno nizak tlak od 31,5 MPa u prvoj fazi hidrooblikovanja, dok se u drugoj fazi koristi manja količina fluida pod visokim tlakom od 200 MPa za kalibraciju završne geometrije proizvoda. [28]



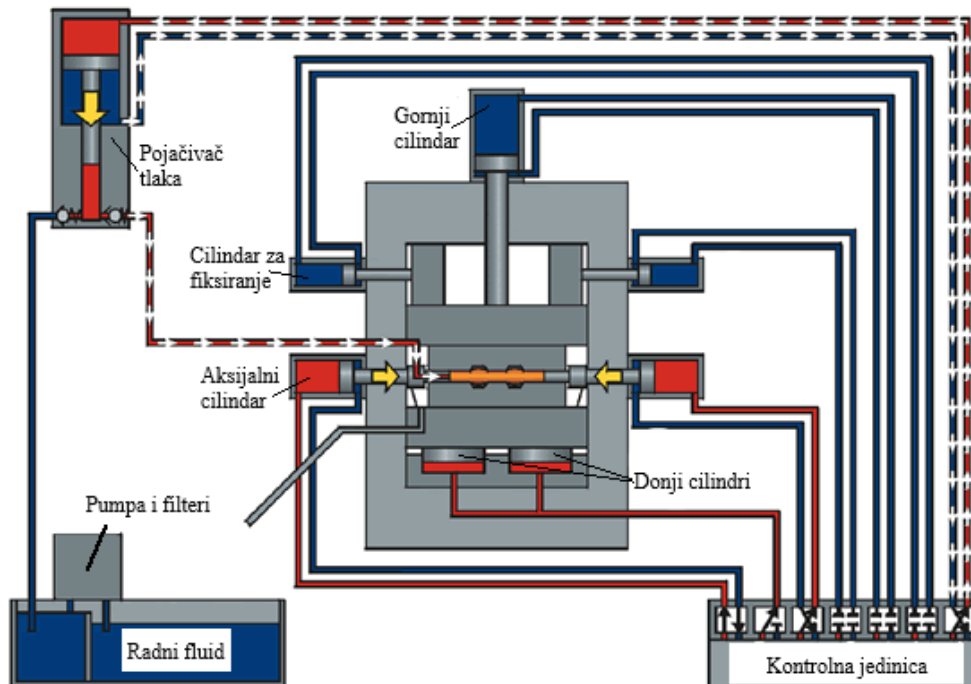
Slika 38. Horizontalna preša za hidrooblikovanje limova [28]

4.2.2. Preša za hidrooblikovanje cijevi

Za hidrooblikovanje cijevi najčešće je korištena jednoradna hidraulična preša. Shematski prikaz procesa s osnovnim komponentama sustava za hidrooblikovanje cijevi prikazan je na slici 39. Glavni dijelovi preše su gornji cilindar za pokretanje malja, bočni cilindri za pokretanje čeličnih blokova, dva donja cilindra kojima se postiže nominalni tlak za proces hidrooblikovanja, aksijalni cilindri za brtvljenje cijevi i stvaranje tlačnog naprezanja u zoni oblikovanja, spremnik radnog fluida s pumpom, sustav za povećanje razine tlaka i kontrolna jedinica. Proces hidrooblikovanja sastoji se od dva osnovna postupka. Prvi postupak karakterizira otvaranje i zatvaranje preše prilikom čega se proizvod umeće i vadi iz stroja. Za to je potreban vertikalni cilindar s dužim hodom a sila koju mora ostvariti mora biti veća od sume težine sklopa malja i gornjeg alata. Drugi postupak vezan je isključivo uz proces hidrooblikovanja prilikom čega je alat zatvoren pomoću sile stezanja koju ostvaruje preša. Nakon što se alat zatvori čelični blokovi koji imaju ulogu distanci pomiču se između malja i okvira preše. Dva cilindra smještena unutar stola preše generiraju silu potrebnu za proces hidrooblikovanja. Radni hod ovih cilindara relativno je kratak a služi za kompenzaciju elastične elongacije okvira preše i razmaka koji je potreban za pomicanje čeličnih blokova u njihov početan i krajnji položaj. [33]

Slika 40. prikazuje 4000 tonsku prešu za hidrooblikovanje cijevi proizvođača Williams-White. Preša je opremljena sustavom pojačavanja tlaka volumena osam litara te je moguće generirati radni tlak od 310 MPa. Veličina preše omogućuje smještanje većih kalupa i izradu

individualnih proizvoda. Preša ima mogućnost hidrooblikovanja pomoću dvije kalupne šupljine istovremeno, a maksimalna širina kalupa iznosi 3048 mm a dužina 6223 mm. [34]



Slika 39. Sustav za hidrooblikovanje cijevi [33]

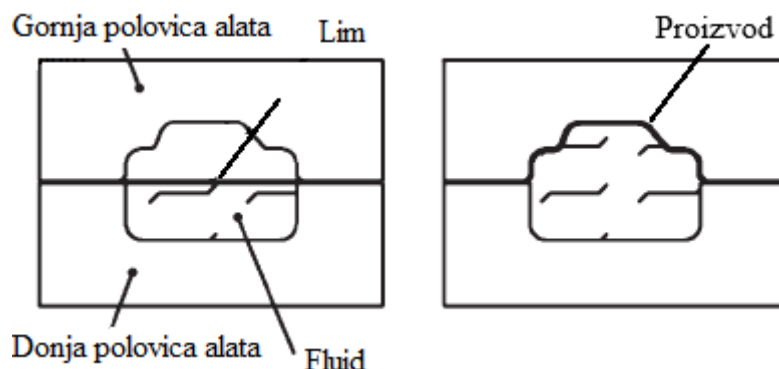


Slika 40. Williams-White 4000 tonska preša za hidrooblikovanje cijevi [35]

4.3. Alati za hidrooblikovanje lima

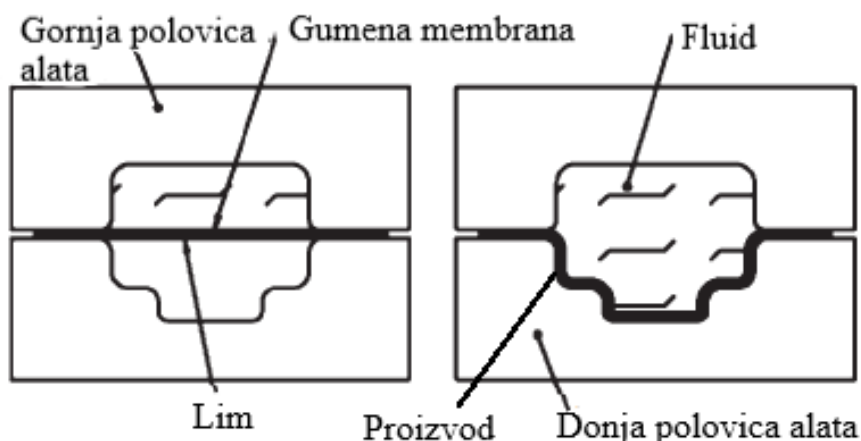
Postoji nekoliko osnovnih načina kojima se izvodi hidrooblikovanje limova. Slika 41. prikazuje donju polovicu alata smještenu ispod komada lima odnosno priprema koja predstavlja tlačnu komoru. Tlačna komora zabrtvljena je kada se obje polovice alata spoje. Gornja polovica alata izrađena je prema završnom obliku proizvoda te se porastom razine tlaka

tlačne komore komad lima deformira prema konturi gornjeg djela alata. Pozicija tlačne komore može biti ovisno o izvedbi smještena u gornjoj polovici ili donjoj polovici kalupa. [13]



Slika 41. Hidrooblikovanje lima pomoću kalupa [13]

Slika 42. prikazuje varijantu procesa kada je zajedno s tlačnom komorom koja može biti smještena u gornjoj ili donjoj polovici kalupa upotrijebljena gumena membrana. Često se na komad lima postavlja gumena zaštitna podloga kako bi se produžio životni vijek gumene membrane. Stlačeni medij se ubrizgava, razina tlaka raste na referentnu vrijednost, a pomoću fleksibilne gumene membrane pripremak se oblikuje prema obliku kalupa. [13]



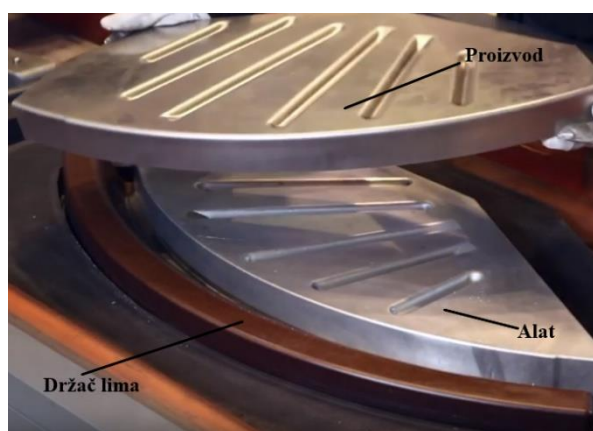
Slika 42. Hidrooblikovanje lima s gumenom membranom [13]

Slika 43. prikazuje donji dio alata preše za hidrooblikovanje QFM 0,8-800 tvrtke Quintus Technologies. Oblik kalupa s izbočenjima ili udubljenjima izrađuje se prema obliku i geometriji završnog proizvoda. U oba slučaja komad lima će pod tlakom fluida popunjavati odnosno prilagođavati se obliku kalupa. Također je moguće postaviti više kalupa na jedan stol preše. Komadi lima potom se postavljaju na kalup, fiksiraju pomoću pinova koji su dio alata, preša se tada zatvara i počinje proces hidrooblikovanja. Time je moguće u jednom radnom hodu preše izraditi veću količinu proizvoda i povećati produktivnost procesa. Slika 44. prikazuje donji dio alata preše QFC 0,7x1,8-800 tvrtke Quintus Technologies koja ostvaruje maksimalni operativni tlak u iznosu od 80 MPa i silu pritiska 170 MN. Držalac lima smješten je na stolu preše kako bi

se bolje kontrolirao proces hidrooblikovanja i spriječilo nabiranje materijala po rubovima. Rubovi držača lima premažu se mazivom prije pozicioniranja komada lima kako bi se kontroliralo trenje.

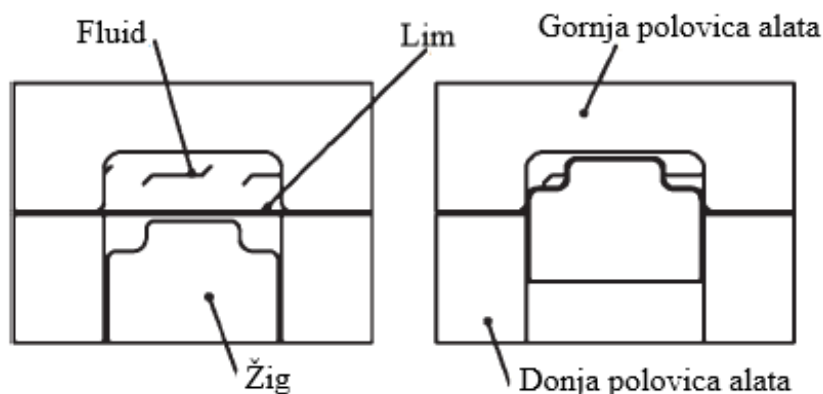


Slika 43. Donji dio alata preše za hidrooblikovanje [36]



Slika 44. Proizvod dobiven hidrooblikovanjem lima gumenom membranom [37]

Za izradu proizvoda složenije geometrije potrebno je korištenje specifičnih naprava za pridržavanje lima na periferiji površine alata kako bi se kontrolirao tok materijala s većom preciznošću. Dodatkom žiga u sklop alata prema slici 45. omogućuje se oblikovanje lima konvencionalnom metodom, a upotrebom stlačenog fluida potpomaže se proces hidrooblikovanja i izvršava završna kalibracija proizvoda. Upotreba ove metode zahtijeva dodatnu kontroliranu os gibanja za pokretač žiga i kompliciraniji dizajn alata. [13]



Slika 45. Hidrooblikovanje lima pomoću žiga [13]

Primjer donje polovice alata i žiga zajedno s gotovim proizvodom izrađenim ovim postupkom prikazan je na slici 46. Tvrtka koja se specijalizirala u tom području je Quintus Technologies, a model hidraulične preše je QFM 0,8-800 s mogućnošću stvaranja tlaka fluida od 80 do 120 MPa, promjerom sirovca od 560 do 1100 mm, vremenom ciklusa od 30 do 120 sekundi i maksimalnom dubinom vučenja 250 mm. [38]



Slika 46. Alat za hidrooblikovanje limova [36]

4.4. Alati za hidrooblikovanje cijevi

Sustav za hidrooblikovanje cijevi sastoji se od nekoliko glavnih komponenti, a to su hidraulična preša, alati, hidraulički pojačivač tlaka i kontrolni sustav. Glavne funkcije tih komponenti su zatvaranje kalupa, održavanje konstantne sile pritiska prilikom procesa hidrooblikovanja, ubrizgavanje fluida pod visokim tlakom u cijev i generiranje aksijalne sile na rubove cijevi u svrhu utiskivanja materijala u alat prilikom procesa hidrooblikovanja. Najčešće korišteni alati u procesu hidrooblikovanja su gornja i donja polovica kalupa u obliku konture završnog proizvoda, izbacivači, aksijalni cilindri i žigovi za oblikovanje. [12]

Slika 47. prikazuje donju polovicu kalupa za hidrooblikovanje okvira šasijske koji služi za oslanjanje automobilskeg motora, zajedno sa aksijalnim cilindrima i potrebnim crijevima za protok hidrauličkog medija. Konstrukcija te izrada alata i proizvoda izvršena je u tvrtci "Mold Tooling Systems" specijalizirane u području konstrukcije i izrade kalupa za hidrooblikovanje primjenjivih u većini današnje industrije. Na slici 48. prikazan je kalup za hidrooblikovanje ispušnih komponenti automobila spomenute tvrtke.



Slika 47. Donja polovica kalupa za hidrooblikovanje okvira šasijske za oslanjanje motora [39]



Slika 48. Kalup za hidrooblikovanje ispušnih komponenti automobila [39]

4.5. Hidraulički sustav za hidrooblikovanje

Hidraulički sustav za hidrooblikovanje prema [3] sastoji se od dva odvojena hidraulička kruga:

- Hidraulički krug s fluidom na bazi ulja
- Hidraulički krug s fluidom na bazi vode

Zatvoreni hidraulički krug na bazi ulja namijenjen je za aktivaciju preše, alata za hidrooblikovanje i hidrauličkog pojačivača tlaka. Dizajniran je za nominalne vrijednosti tlaka najčešće između 20 i 35 MPa, medij nije izložen okolišu kako bi se omogućila zaštita od kontaminacije, oksidacije te iz sigurnosnog stajališta. Hidraulički krug na bazi vode namijenjen je za osiguravanje visokotlačnog hidrooblikovanja. Radni fluid korišten u procesu hidrooblikovanja je voda s dodatkom 5-10 % ulja i ostalih aditiva u svrhu zaštite protiv korozije i bakterija. Najčešće se koriste sintetički bazirana ulja koja omogućuju optimalna svojstva radnog medija, osiguravaju visoku otpornost na nečistoće i eventualno miješanje s hidrauličnim uljem koje može curiti iz alata. Ovaj hidraulički krug sastoji se od niskotlačnog sustava za brzu opskrbu fluidom s visokim vrijednostima protoka i visokotlačnog sustava s malim

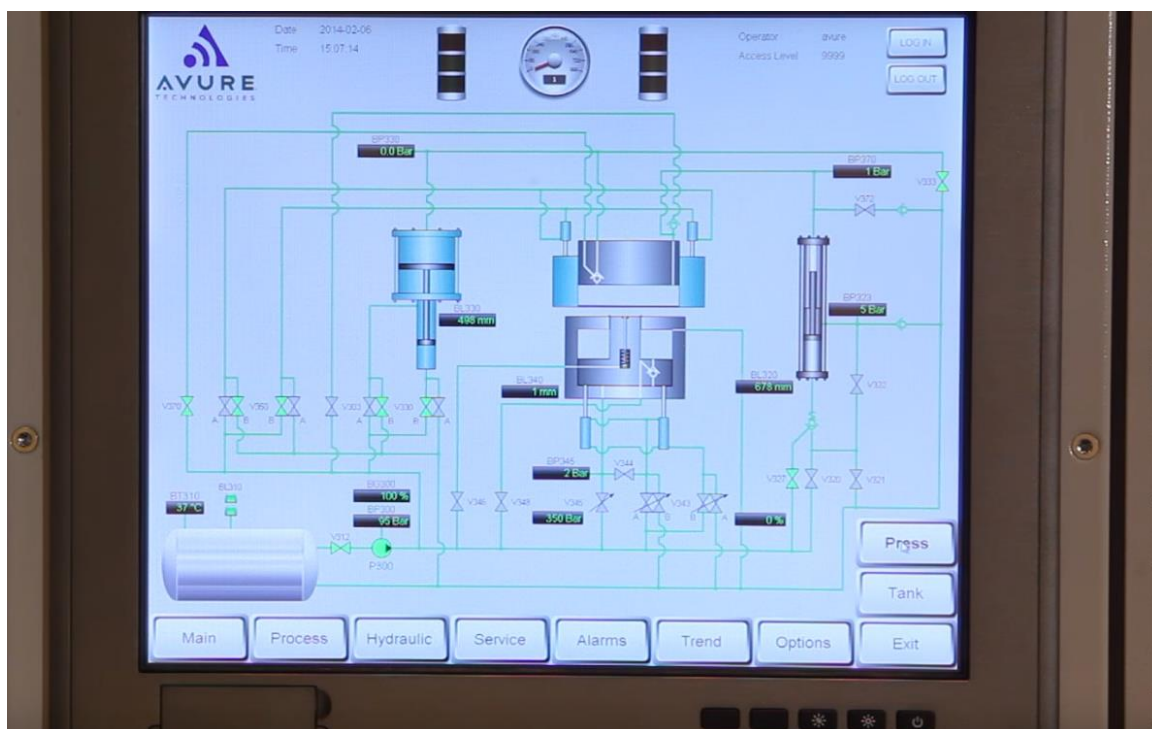
vrijednostima protoka za opskrbu pojačivača tlaka fluida i postizanje radnih vrijednosti tlaka fluida od 70 do 415 MPa. Na tako visokim razinama tlaka treba uzeti u obzir moguću stlačivost radnog medija u iznosu od 1 do 11 % prilikom određivanja prikladnosti hidrauličkog sustava za hidrooblikovanje određenog proizvoda. Radni fluid se nakon završenog hidrooblikovanja filtrira prije vraćanja u glavni rezervoar. [3]

4.6. Kontrolni i regulacijski sustav

Bitne operacije u postupku hidrooblikovanja kao što su otvaranje i zatvaranje preše, brtvljenje, određivanje razine tlaka radnog medija i ostali procesni zahtjevi ostvaruju se pomoću kontrolnog i regulacijskog sustava. Najčešće se za potrebe kontrole i regulacije koristi PLC odnosno programabilni logički kontroler. [3]

To je industrijsko računalo sastavljeno od memorije, procesora, industrijskih ulaza i izlaza u obliku raznih sklopki i pretvornika. [40]

Sve funkcije praćene pomoću kontrolnog sustava prikazane su na korisničkom sučelju kojem operater ima pristup te je moguće programirati sustav tim putem. Vizualni prikaz procesa u korisničkom sučelju predstavlja značajnu pomoć operateru o stvarnom događanju unutar preše odnosno donosi informacije o iznosu radnog tlaka, opterećenju stroja, poziciji cilindara i drugim bitnim parametrima. Primjer takvog korisničkog sučelja preše za hidrooblikovanje QFM 0,8-800 prikazano je na slici 49.



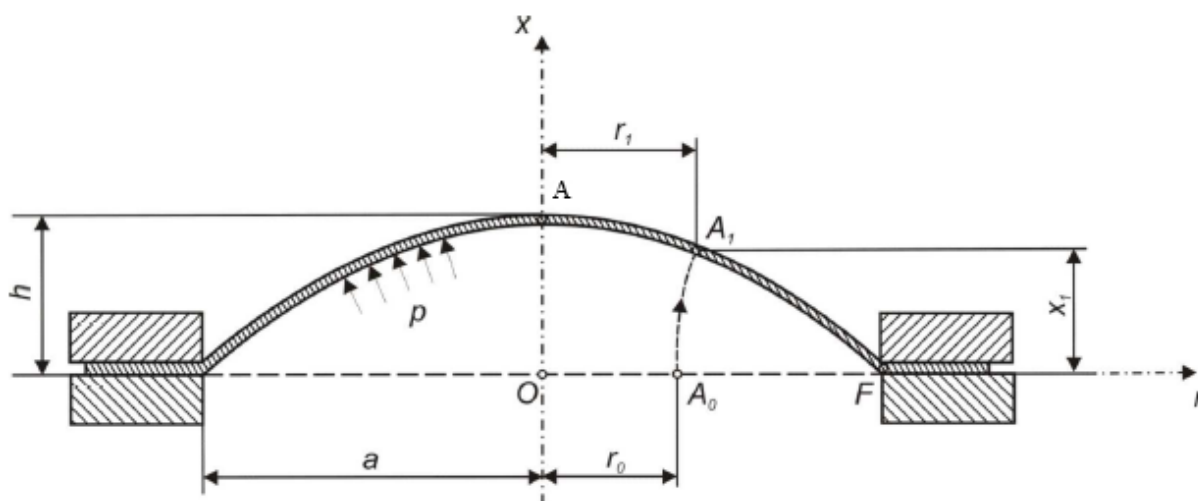
Slika 49. Korisničko sučelje preše za hidrooblikovanje QFM 0,8-800 [36]

5. HIDRAULIČKO UDUBLJIVANJE

Kao primjer pojednostavljenog procesa hidrooblikovanja, koji još uvijek sadržava sve specifične elemente deformiranja djelovanjem pritiska fluida, moguće je prikazati proces hidrauličkog udublivanja. Ovaj proces najčešće se koristi u svrhu ispitivanja materijala namijenjenih hidrooblikovanju i njime se na uspješan način provjerava stanje deformacije (rastezanja i stanjivanja) lima u uvjetima hidrooblikovanja. Zbog toga je ovaj proces u radu korišten kao ilustracija samog procesa hidrooblikovanja, ali i kao ilustracija procesa ispitivanja ponašanja samog materijala u specifičnim uvjetima procesa.

5.1. Osnovni pojmovi hidrauličkog udublivanja

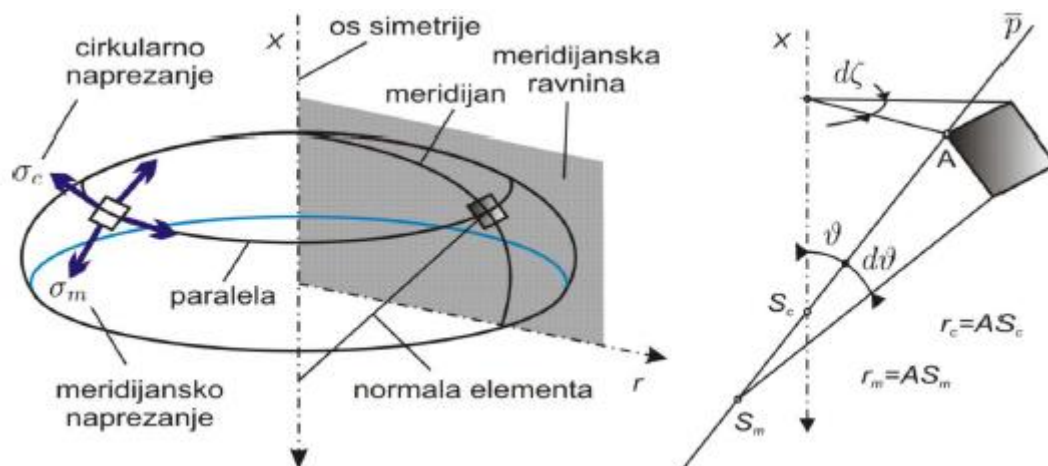
U postupku hidrauličkog udublivanja koji je prikazan na slici 50. rondela je pričvršćena po obodu te se deformira zbog djelovanja tlaka hidrauličkog medija p . Najveće stanjenje stijenke događa se na polu ispupčenja A uz pripadajuću visinu ispupčenja h . Za tu točku određuje se uređeni par ekvivalentne deformacije i ekvivalentnog napreznja (φ_{ekv} , σ_{ekv}) koja je ujedno jedna točka krivulje plastičnog tečenja. [41]



Slika 50. Shema hidrauličkog udublivanja [41]

Osnosimetrična ljuska nastaje rotacijom meridijana oko osi X što je prikazano na slici 51. Time nastaje dvostruko zakrivljena površina čije su karakteristične veličine cirkularni polumjer zakrivljenosti r_c i meridijanski polumjer zakrivljenosti r_m . Pravac \bar{p} na kojemu se nalaze polumjeri zakrivljenosti promatrane točke A , poklapa se s normalom točke A i nalazi u meridijanskoj ravnini. Vidljivo je da se središte cirkularnog polumjera zakrivljenosti S_c nalazi na osi X dok je položaj središta meridijanskog polumjera zakrivljenosti S_m na pravcu \bar{p} što ovisi o geometriji ravninske krivulje kojom je inducirana osnosimetrična ljuska. [41]

Glavna vlačna naprezanja koja djeluju na diferencijalnom elementu osnosimetrične ljuske prikazana su na slici 51. a to su cirkularno naprezanje σ_c i meridijansko naprezanje σ_m . Njihov smjer djelovanja međusobno je okomit, a nastaju zbog djelovanja tlaka hidrauličkog medija p na unutarnjoj strani cirkularnog radijusa r_c . [41]



Slika 51. Osnosimetrična ljuska s pripadajućim osnovnim veličinama [41]

Kako bi u osnosimetričnoj ljusci bilo zastupljeno membransko naprezanje važno je da su prema [41] zadovoljene sljedeće pretpostavke:

1. Debljina ljuske s je neznatna u odnosu na cirkularni polumjer zakrivljenosti r_c i meridijanski polumjer zakrivljenosti r_m , odnosno vrijedi sljedeći izraz

$$\frac{s}{r_m} \leq \frac{1}{20}, \frac{s}{r_c} \leq \frac{1}{20} \quad (5.1)$$

2. Promjena opterećenja duž meridijana je postupna

$$\left| \frac{Dr_c^2}{E_s} \frac{d^4 p_n}{dl^4} \right| \ll |p_n| \quad (5.2)$$

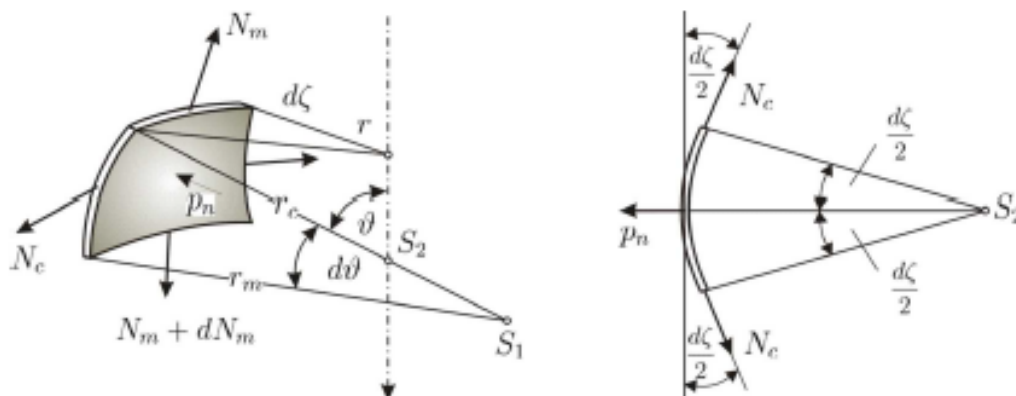
gdje je D fleksijska krutost ljuske, p_n tlak koji djeluje na ljusku, dl diferencijal duljine u meridijanskoj ravnini.

3. Promjena polumjera zakrivljenosti je blaga

$$\left| \frac{Dr_c^2}{E_s} \frac{d^4}{dl^4} \frac{1}{r_m} \right| \ll \left| \frac{1}{r_m} \right| \quad (5.3)$$

Postavljajući uvjete ravnoteže na diferencijalni element membrane prikazan na slici 52. dobivaju se diferencijalne jednačbe čijim se rješavanjem prema [41] dobije jednačba membrane. Prilikom postavljanja uvjeta ravnoteže prema [42], sile N_m i N_c bit će nepoznanice, te se odnose na jedinicu duljine i moraju se množiti s duljinom stranice elementa na kojem

djeluju čime se dobivaju sile $N_m r d\zeta$ i $(N_m + dN_m)(r + dr)d\zeta$ koje zatvaraju kut $d\vartheta/2$ s normalom diferencijalnog elementa.



Slika 52. Diferencijalni element membrane [41]

Ako se zanemare male veličine višeg reda i uzme vrijednost $\sin(d\vartheta/2) = d\vartheta/2$ jer je $d\vartheta$ infinitezimalno mali kut, zbroj projekcija dobivenih sila na pravac normale iznosi:

$$-N_m r d\zeta \sin \frac{d\vartheta}{2} - (N_m + dN_m)(r + dr)d\zeta \sin \frac{d\vartheta}{2} = -N_m r d\zeta \sin d\vartheta \quad (5.4)$$

Cirkularne sile $N_c r_m d\vartheta$ projiciraju se u radijalan pravac i tvore zajedničku rezultantu $-2N_m r d\zeta \sin \frac{d\vartheta}{2} = -N_m r_m d\vartheta d\zeta$. Ako se ta rezultanta projicira na smjer normale dobiva se $-N_m r_m d\vartheta d\zeta \sin \vartheta$, jer normala s radijalnim pravcem čini kut $(\frac{\pi}{2} - \vartheta)$. Slijedi da je opterećenje p_m okomito na normalu i time ne ulazi u uvjet ravnoteže. Opterećenje p_n projicira se u smjer normale a rezultanta glasi $p_n r_m d\vartheta r d\zeta$.

Postavljanjem uvjeta ravnoteže na diferencijalni element membrane odnosno sumiranjem svih sila u smjeru normale slijedi jednačba:

$$\sum F_n = -N_m r d\zeta d\vartheta - N_m r_m d\vartheta d\zeta \sin \vartheta + p_n r_m d\zeta r d\vartheta \quad (5.5)$$

Ako se jednačba (5.5) podijeli sa $r_m r d\zeta d\vartheta$ dobiva se

$$\frac{N_m}{r_m} + \frac{N_c}{r} \sin \vartheta = p_n \quad (5.6)$$

Ako vrijedi da je $r = r_c \sin \vartheta$ izraz (5.6) može se zapisati kao

$$\frac{N_m}{r_m} + \frac{N_c}{r} = p_n \quad (5.7)$$

Dijeljenjem jednadžbe (5.7) s debljinom ljuske s , dobiva se jednadžba membrane

$$\frac{\sigma_m}{r_m} + \frac{\sigma_c}{r_c} = \frac{p_n}{s} \quad (5.8)$$

gdje je p_n tlak koji djeluje na konkavnoj strani cirkularnog radijusa ljuske, s debljina ljuske, σ_m meridijansko naprezanje, σ_c cirkularno naprezanje, r_m meridijanski polumjer zakrivljenosti i r_c cirkularni polumjer zakrivljenosti.

5.2. Pretpostavke o shemi deformacija kod hidrauličkog udublivanja

Kod postupka hidrauličkog udublivanja uvesti će se dvije pretpostavke o shemi deformacija:

1. Ravnomjerno ravninsko naprezanje u kojem je cirkularna deformacija jednaka meridijanskoj odnosno $\varphi_m = \varphi_c$
2. Ravninsko stanje deformacija u meridijanskoj ravnini uz pretpostavku da je iznos cirkularne deformacije nula odnosno $\varphi_c = 0$

5.3. Uvjet plastičnog tečenja

Za ostvarivanje plastične deformacije mora biti zadovoljen uvjet tečenja čime je definirano koji se iznos naprezanja mora savladati da bi metal postigao kontinuirano tečenje i u konačnici postigao završni oblik proizvoda.[43]

Prema [44], teorija najveće distorzijske energije govori da će do plastične deformacije materijala će doći kada je akumulirana energija prilikom plastične deformacije u uvjetima troosnog napregnutog stanja jednaka energiji pri promjeni oblika kod pretpostavljenog jednoosnog napregnutog stanja kod kojeg nastupa trajna deformacija.

Materijal kod hidrauličkog udublivanja teče na polu ispupčenja i u ostalim točkama slobodno deformirajuće površine čime je ispunjen uvjet plastičnog tečenja.

Za troosno napregnuto stanje Von Mises-ov uvjet plastičnog tečenja glasi:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 k_f^2 \quad (5.9)$$

Do tečenja materijala dolazi ako je ekvivalentno naprezanje jednako naprezanju plastičnog tečenja, odnosno :

$$\sigma_{ekv} = k_f \quad (5.10)$$

Izraz za ekvivalentno naprezanje definiran pomoću glavnih naprezanja iz jednadžbi (5.9) i (5.10) glasi:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5.11)$$

Pretpostavkom ravninskog stanja naprezanja kod hidrauličkog udublivanja gdje su cirkularno naprezanje σ_c i meridijansko naprezanje σ_m glavna naprezanja što se može zapisati kao $\sigma_m = \sigma_1$ i $\sigma_c = \sigma_2$, slijedi izraz za ekvivalentno naprezanje kod hidrauličkog udublivanja:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_c = \sigma_m \quad (5.12)$$

Pretpostavkom jednakosti cirkularnog i meridijanskog naprezanja, njihove jednakosti ekvivalentnom naprezanju (5.12) te jednakošću ekvivalentnog naprezanja i naprezanja plastičnog tečenja iz jednadžbe membrane (5.8) proizlazi:

$$\frac{k_f}{r_m} + \frac{k_f}{r_c} = \frac{p}{s} \quad (5.13)$$

Uz pretpostavku sferne geometrije ispuščenja, gdje je $r_m = r_c = r$ naprezanje plastičnog tečenja može se izraziti u obliku:

$$k_f = \frac{rp}{2s} \quad (5.14)$$

gdje je r radijus zakrivljenosti, p tlak udublivanja, a s debljina stanjenog lima

Radijus zakrivljenosti ljuske može se izraziti kao:

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{a^2}{h} + h \right) \quad (5.15)$$

gdje je a radijus matrice hidrauličkog udublivanja, a h visina ispuščenja

5.4. Krivulja plastičnog tečenja

Krivulja plastičnog tečenja povezuje prirodnu deformaciju φ i naprezanje plastičnog tečenja k_f koje se može definirati kao naprezanje koje će kod jednoosnog napregnutog homogenog stanja pokrenuti plastičnu deformaciju materijala. [43] Krivulju plastičnog tečenja u postupku hidrauličkog udublivanja određuje ekvivalentna deformacija φ_{ekv} smještena na osi apscisa, te naprezanje plastičnog tečenja k_f smješteno na osi ordinata.

Izraz za naprezanje plastičnog tečenja dobiven iz jednažbi (5.14) i (5.15) glasi:

$$k_f = \frac{1}{4} \frac{p}{s_1} \left(\frac{a^2}{h} + h \right) \quad (5.16)$$

gdje je p tlak oblikovanja, s_1 konačna debljina lima na polu, h izmjerena visina ispupčenja, i a polumjer matrice hidrauličkog udublivanja.

Izraz za ekvivalentnu deformaciju φ_{ekv} glasi:

$$\varphi_{\text{ekv}} = \ln \frac{s_0}{s_1} \quad (5.17)$$

gdje je s_0 početna debljina lima a s_1 konačna debljina lima na polu.

6. MJERENJA

6.1. Naprava za hidrauličko udubljivanje

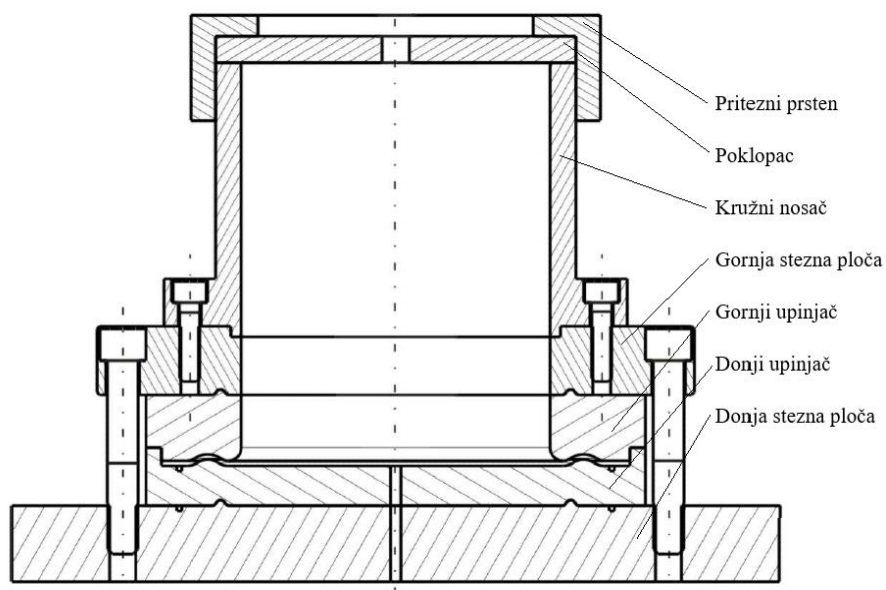
Mjerenja vezana za hidrauličko udubljivanje aluminijskih rondela debljine 1 mm izvedena su u laboratoriju za oblikovanje deformiranjem na napravi prikazanoj na slici 53. Moguće je izvođenje eksperimenata s limovima debljine do 2 mm a maksimalni tlak iznosi 10 MPa. Slika 55. prikazuje presjek centralnog dijela naprave za hidrauličko udubljivanje s glavnim dijelovima, a na slici 56. prikazana je hidraulična shema s glavnim komponentama koje ostvaruju potreban tlak za hidrauličko udubljivanje. Izgled rondela prije i nakon hidrauličkog udubljivanja zajedno s osnovnim dijelovima naprave prikazan je na slici 54.



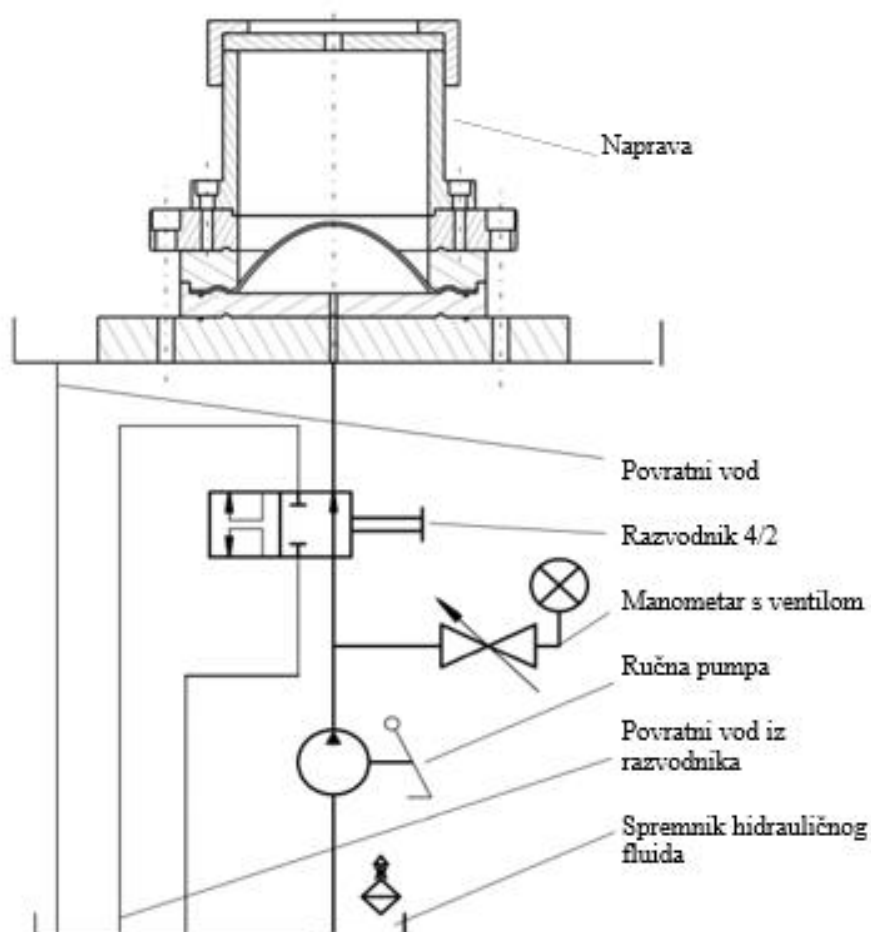
Slika 53. Naprava za hidrauličko udubljivanje



Slika 54. Rondela prije i nakon hidrauličkog udubljivanja



Slika 55. Presjek centralnog dijela naprave za hidrauličko udubljivanje [41]



Slika 56. Hidraulična shema naprave za hidrauličko udubljivanje lima [41]

6.2. Postupak i rezultati eksperimentalnog mjerenja

Postupak eksperimentalnog mjerenja započinje pozicioniranjem rondela debljine 1 mm u napravu odnosno na donji upinjač rondela. Rondela se prethodno deformira na preši kako bi se po obodu rondela stvorio valoviti rub prikladan za hidrauličku napravu u svrhu brtvljenja kako ne bi dolazilo do curenja hidrauličkog fluida. Druga funkcija valovitog ruba je lakše pozicioniranje rondela u napravu i sprečavanje njenog pomicanja tijekom procesa hidrauličkog udublivanja. Zatvaranjem naprave odnosno pritezanjem vijaka pozicioniranih na steznim pločama ostvaruje se potrebna sila stezanja rondela. Pomoću ručne pumpe generira se potreban tlak fluida koji deformira rondelu. Visina ispuščenja rondela eksperimentalno je određena pomoću dubinomjera tako da se mjeri podizanje mjerne gljive. Razlika na skali dubinomjera između konačne i početne visine je iznos visine ispuščenja rondela h_A . Debljina stijenke rondela s_A na polu A nakon hidrauličkog udublivanja izmjerena je pomoću uređaja za mjerenje debljine prikazanom na slici 57.



Slika 57. Uređaj za mjerenje debljine

Mjerenje je provedeno na tlakovima od 0,5 do 2 MPa s inkrementalnim povećanjem tlaka od 0,25 MPa po mjerenju, a za svako mjerenje korištene su dvije rondela odnosno ukupno 14 rondela. Dobiveni rezultati kod mjerenja na određenom tlaku zbrojeni su i podijeljeni s brojem 2 kako bi se dobila srednja vrijednost mjerenja.

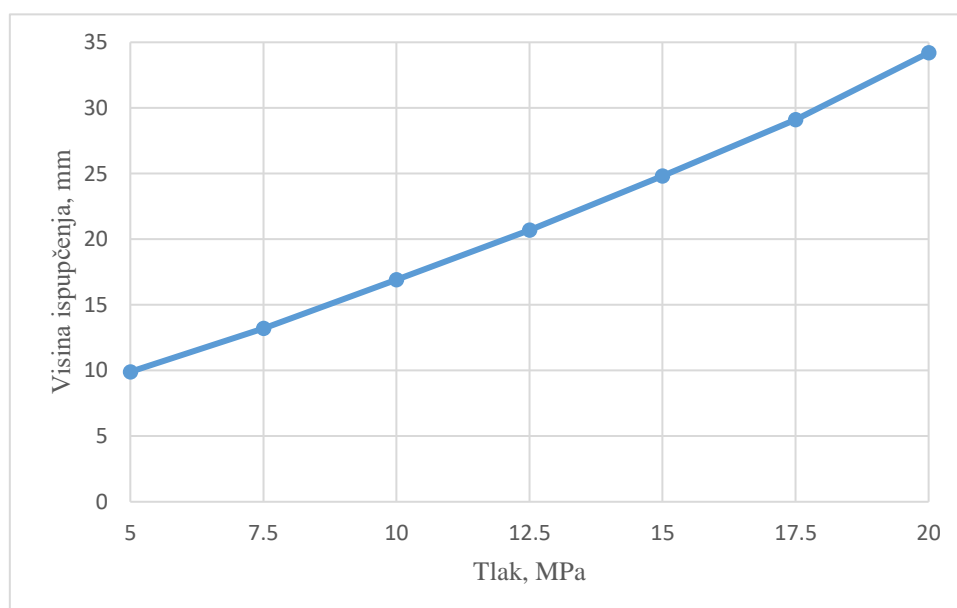
Ovim postupkom mjerile su se sljedeće veličine:

1. Visina ispuščenja rondela h_A
2. Debljina stijenke rondela na polu s_A

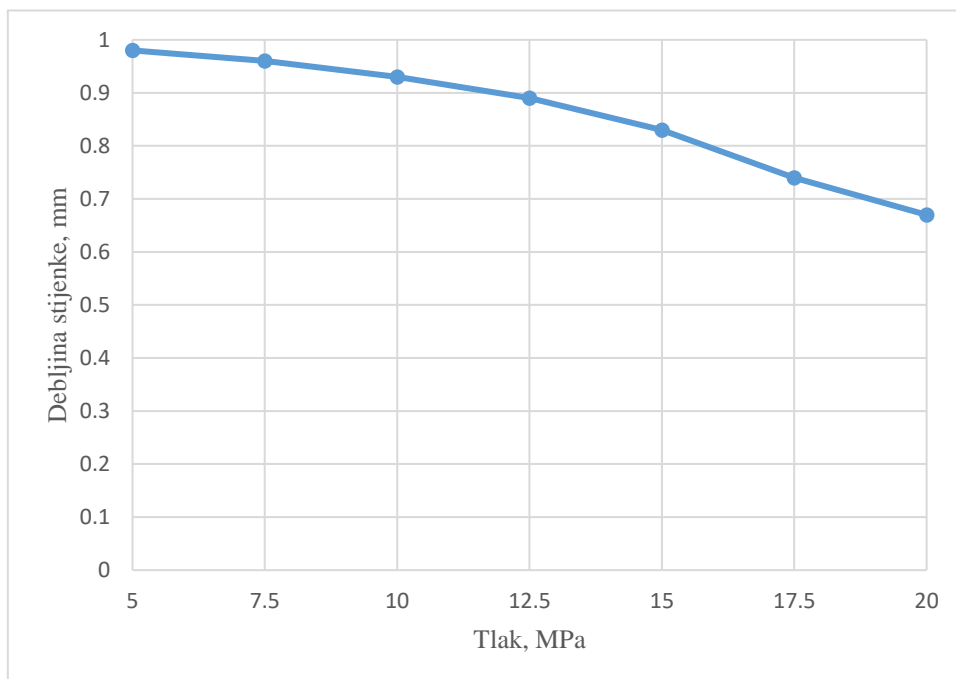
U tablici 2. prikazani su eksperimentalni rezultati visine ispućenja i debljine stijenke ronđele na polu A. Ovisnost visine ispućenja ronđele h_A o različitim vrijednostima tlaka p prikazana je na slici 58. dok je ovisnost debljine stijenke ronđele s_A o različitim vrijednostima tlaka p prikazana na slici 59.

Tablica 2. Eksperimentalni rezultati visine ispućenja i debljine stijenke ronđele na polu A

p , MPa	$h_{A,eksp}$, mm	$s_{A,eksp}$, mm
0,5	9,9	0,98
0,75	13,2	0,96
1	16,9	0,93
1,25	20,7	0,89
1,5	24,8	0,83
1,75	29,1	0,74
2	34,2	0,67



Slika 58. Eksperimentalni rezultati ovisnosti visine ispućenja ronđele o tlaku



Slika 59. Eksperimentalni rezultati ovisnosti debljine stijenke ronđele o tlaku

7. RAČUNALNA SIMULACIJA

7.1. Parametri simulacije

Računalna simulacija hidrauličkog udublivanja rondele provedena je u programskom paketu ANSYS 2019 R3 pomoću metode konačnih elemenata.

Za izradu uspješne simulacije potrebno je podesiti navedene parametre:

1. Odabir sustava analize
2. Inženjerska baza materijala
3. Geometrija modela
4. Postavke modela
5. Postavke simulacije
6. Rezultati simulacije

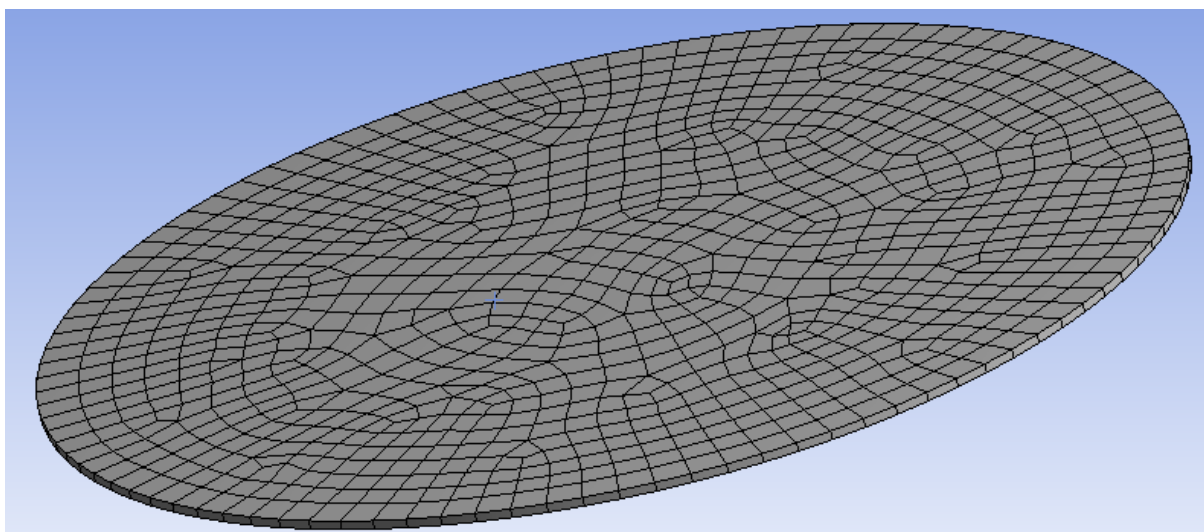
Unutar korisničkog sučelja programa za odabir sustava analize izabrana je opcija statičkog modela kako bi se izvela simulacija. Dalje je potrebno definirati materijal odnosno Al 99,5 koji je preuzet iz ANSYS inženjerske baze podataka a modeliran je kao elastoplastičan materijal s izotropnim svojstvima. U tablici 3. prikazana su fizikalna i mehanička svojstva za materijal Al 99,5 potrebna za izvođenje simulacije.

Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva za materijal Al 99,5

Svojstva materijala Al 99,5	Vrijednost	Mjerna jedinica
Gustoća	2770	kg/m ³
Youngov modul elastičnosti	71000	MPa
Poissonov omjer	0,33	-
Konvencionalna granica tečenja	66	MPa
Tangentni modul	118	MPa
Specifični toplinski kapacitet	875	J/kgK
Talište	600	°C

Nakon odabira materijala potrebno je nacrtati model rondele. U korisničkom sučelju SpaceClaim koji je sastavni dio programskog paketa ANSYS 2019 R3 nacrtana je rondela promjera 127 mm jer je taj dio rondele opterećen tlakom fluida prilikom hidrauličkog

udubljivanja. Geometriju rondele čini jedna cilindrična površina kojoj će se naknadno dodati debljina od 1 mm u postavkama simulacije. U postavkama modela u glavnom korisničkom sučelju programa ANSYS 2019 R3 potrebno je ponovno odabrati materijal Al 99,5 definiran u bazi podataka. Također je potrebno odrediti debljinu stijenke materijala koja u ovom slučaju iznosi 1 mm. Na tako definiranoj rondeli potrebno je generirati mrežu konačnih elemenata. Za metodu umrežavanja odabrana je rubno dominantna metoda kvadrata s linearnom raspodjelom konačnih elemenata gdje je veličina jednog elementa 4 mm. Time je dobivena mreža s 971 čvorova i 926 konačnih elemenata prikazana na slici 60.



Slika 60. Mreža konačnih elemenata

Sljedeće je potrebno odrediti postavke simulacije. S obzirom na to da se deformacija rondele odvija kontinuirano za simulaciju je odabran jedan korak s trajanjem od 10 sekundi. Budući da je kod hidrauličkog udubljivanja elastična deformacija zastupljena u malom postotku, plastična deformacija je glavna komponenta deformacije, stoga ju je potrebno pravilno definirati kako bi računalna simulacija dala zadovoljavajuće rezultate. Zbog toga je potrebno uključiti opciju velikih otklona kako bi se unutar programa omogućila simulacija u plastičnom području.

Opcija velikih otklona prema [45] čest je izraz prilikom definiranja geometrijskih nelinearnosti i trebala bi biti uključena u rješenje problema kada god se završna geometrija proizvoda značajno razlikuje od početne kao u slučaju hidrauličkog udubljivanja. Uključenjem ove postavke metoda konačnih elemenata izvodi iterativno rješenje problema, ažurirajući matricu krutosti baziranu na inkrementalnom premještanju čvorova u svakoj iteraciji ravnoteže.

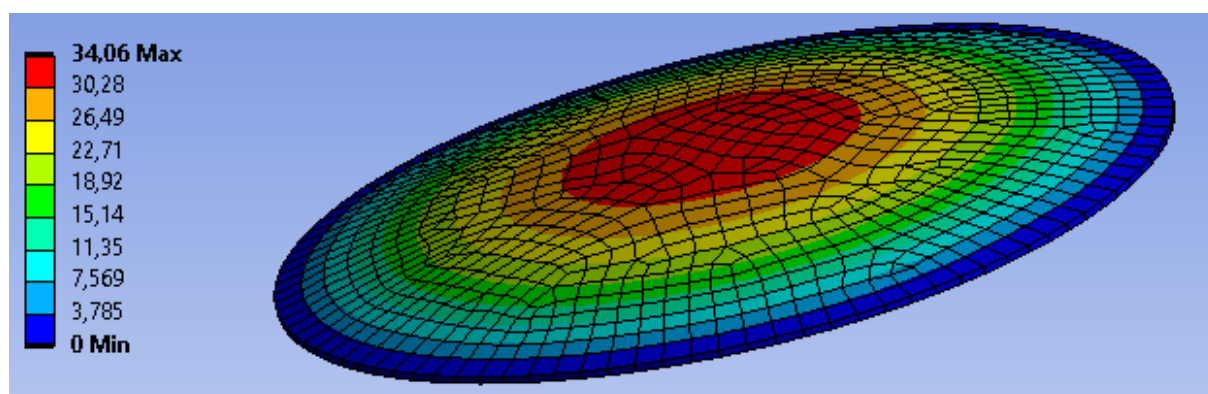
Prilikom odabira materijala također je vezano za plastičnu deformaciju odabrana opcija dvostrukog linearnog izotropnog očvršćivanja koja određuje ponašanje materijala u plastičnom području. Opcija je definirana konvencionalnom granicom tečenja koja za materijal Al 99,5 iznosi 66 MPa i tangentnim modulom iznosa 118 MPa koji prema [46] označava odnos

naprezanja i deformacije u bilo kojoj točki u plastičnom području dijagrama. Može se reći da je tangenti modul nagib tangente na krivulju koja opisuje odnos naprezanja i deformacija u bilo kojoj točki definiranoj naprezanjem i deformacijom u plastičnom području.

Po obodu ronđele fiksirano je svih šest stupnjeva slobode gibanja, tri rotacije i tri translacije u smjeru X , Y i Z osi. Na ronđelu je također definirano djelovanje tlaka okomito na površinu u obliku površinskog efekta s iznosima od 0,5 do 2 MPa s inkrementalnim povećanjem vrijednosti od 0,25 MPa. Posljednji korak je odabir željenih veličina koje će se izračunati simulacijom. Odabrane su ukupna deformacija u smjeru Z osi odnosno visina ispupčenja ronđele, ekvivalentna plastična deformacija ε_{pl} i ekvivalentna ukupna deformacija ε_{uk} .

7.2. Rezultati numeričke simulacije

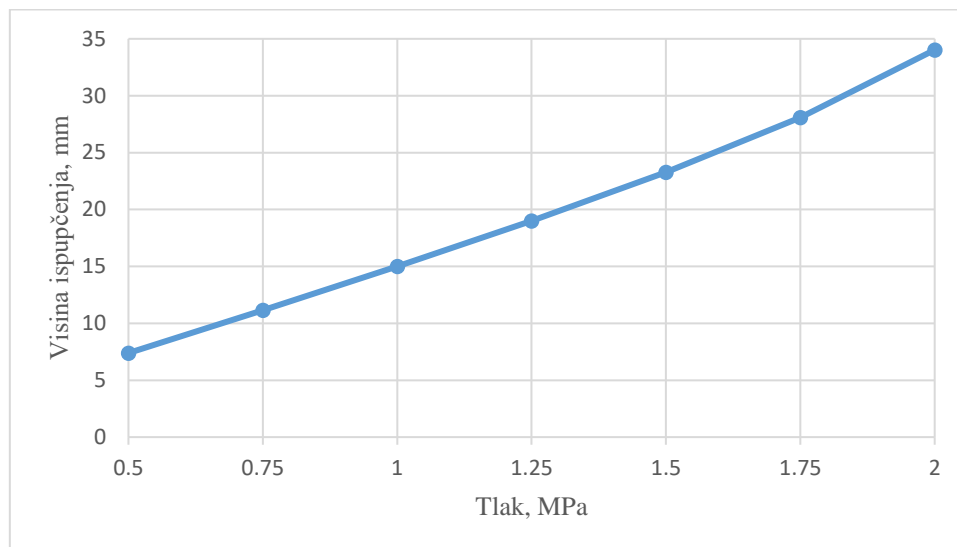
Na slici 61. prikazana je ukupna deformacija u smjeru Z osi koja određuje visinu ispupčenja ronđele na polu pri vrijednosti tlaka $p = 2$ MPa. Rezultati simulacije za različite vrijednosti tlaka prikazani su u tablici 4. Ovisnost visine ispupčenja ronđele $h_{A,num}$ dobivene računalnom simulacijom o različitim vrijednostima tlaka p prikazana je na slici 62.



Slika 61. Simulacija visine ispupčenja ronđele opterećene tlakom

Tablica 4. Rezultati visine ispupčenja ronđele dobiveni računalnom simulacijom

p , MPa	$h_{A,num}$, mm
0,5	7,39
0,75	11,16
1	15,01
1,25	19,01
1,5	23,28
1,75	28,09
2	34,06



Slika 62. Ovisnost visine ispupčenja ronđele o tlaku dobivene računalnom simulacijom

Budući da je kod hidrauličkog udublјivanja elastična deformacija zastupljena u vrlo malom postotku, plastična deformacija je glavna komponenta deformacije. U tablici 5. prikazani su rezultati ekvivalentne plastične deformacije, ekvivalentne ukupne deformacije i deblјine stijenke ronđele dobiveni računalnom simulacijom. Ovisnost ekvivalentne ukupne deformacije o tlaku dobivene računalnom simulacijom prikazana je na slici 63. Razliku ekvivalentne ukupne deformacije i ekvivalentne plastične deformacije čini ekvivalentna elastična deformacija čiji iznos je prema dobivenim rezultatima zanemariv. Izračun deblјine stijenke ronđele nakon deformacije nije moguće izračunati trodimenzionalnom računalnom simulacijom pa se ona izračunava prema sljedećem izrazu:

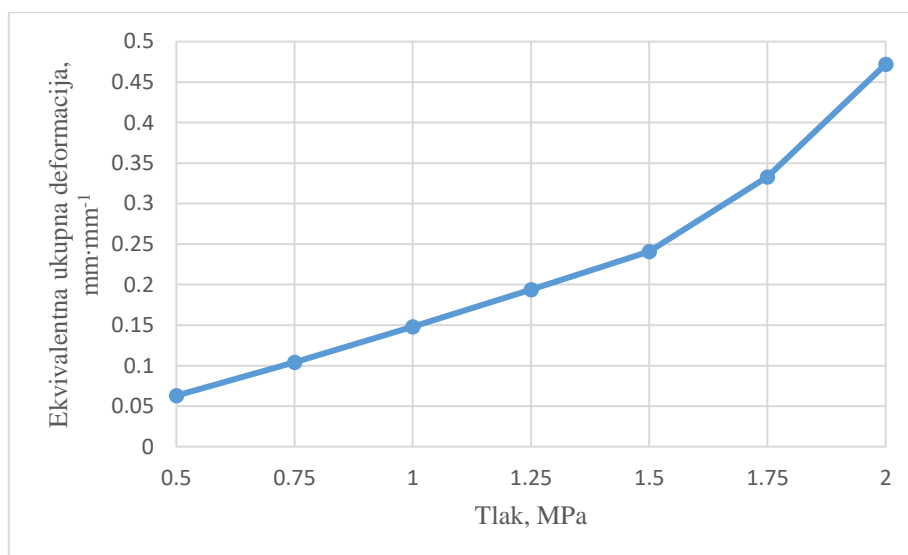
$$s_{A,num} = \frac{s_0}{e^{\epsilon_{uk}}} \quad (7.1)$$

gdje je $s_{A,num}$ deblјina stijenke ronđele dobivena računalnom simulacijom, s_0 početna deblјina lima iznosa 1 mm i ϵ_{uk} ekvivalentna ukupna deformacija.

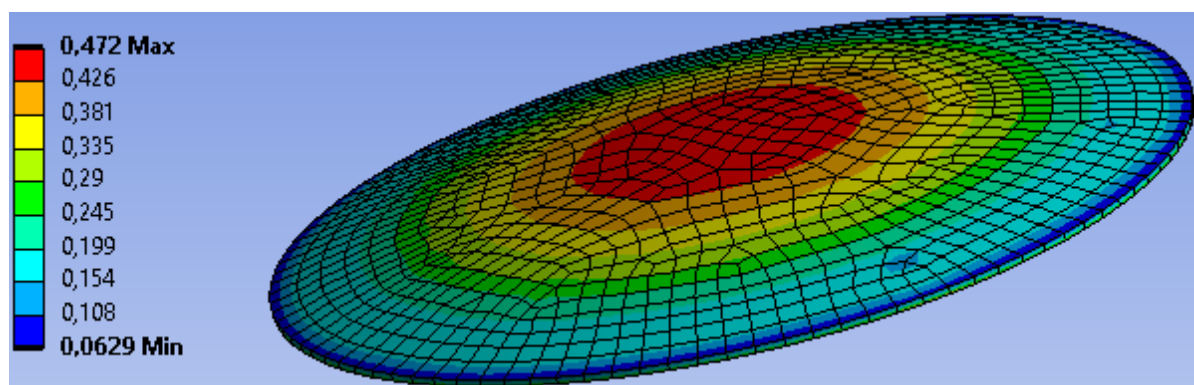
Simulacija ukupne plastične deformacije ronđele opterećene tlakom $p = 2$ MPa prikazana je na slici 64. Vidljivo je kako je područje plastične deformacije najviše izraženo na polu ronđele gdje je i visina ispupčenja najveća.

Tablica 5. Rezultati ukupne plastične deformacije i debljine stijenke ronđele dobiveni računalom simulacijom

p , MPa	$\epsilon_{pl,num}$	$\epsilon_{uk,num}$	$s_{A,num}$, mm
0,5	0,062	0,063	0,94
0,75	0,103	0,104	0,90
1	0,147	0,148	0,86
1,25	0,192	0,194	0,82
1,5	0,24	0,241	0,79
1,75	0,331	0,333	0,72
2	0,47	0,472	0,62



Slika 63. Ovisnost ekvivalentne ukupne deformacije o tlaku dobivene računalom simulacijom



Slika 64. Simulacija ukupne plastične deformacije ronđele opterećene tlakom

7.3. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata

Usporedba visine ispuščenja ronđele na polu u ovisnosti o tlaku od 0,5 do 2 MPa s inkrementalnim povećanjem od 0,25 MPa po mjerenju prikazana je u tablici 6. i na slici 65. Krivulja dobivena eksperimentalnom metodom prikazana je narančastom bojom i trokutima u točkama izmjerenih vrijednosti dok je krivulja dobivena numeričkom simulacijom prikazana plavom bojom i krugovima u točkama izmjerenih vrijednosti. Vidljivo je kako su vrijednosti dobivene numeričkom simulacijom manje od eksperimentalnih vrijednosti. Također je vidljivo da je relativna razlika rezultata veća na nižim vrijednostima tlaka, gdje za vrijednost tlaka od 1 MPa iznosi 11,2 %. Povećanjem vrijednosti tlaka odnosno plastične deformacije relativna razlika se smanjuje i jako približava vrijednostima dobivenim eksperimentalnim postupkom, odnosno za konačan tlak od 2 MPa iznosi 0,5 %.

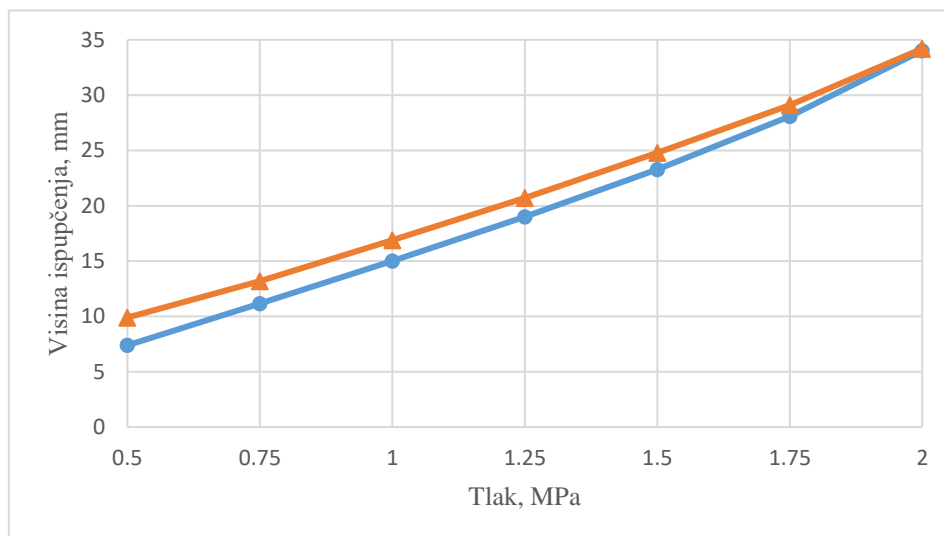
Prema tome može se reći da numerički model ronđele u simulaciji sa zadovoljavajućom točnošću prikazuje provedeno eksperimentalno hidrauličko udublјivanje lima deblјine 1 mm.

Relativna razlika visine ispuščenja ronđele između dvije metode određena je izrazom:

$$\Delta h = \frac{h_{A,\text{eksp}} - h_{A,\text{num}}}{h_{A,\text{eksp}}} \cdot 100 \% \quad (7.2)$$

Tablica 6. Usporedba visine ispuščenja dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom

p , MPa	$h_{A,\text{eksp}}$, mm	$h_{A,\text{num}}$, mm	Δh , %
0,5	9,9	7,39	25,4
0,75	13,2	11,16	15,5
1	16,9	15,01	11,2
1,25	20,7	19,01	8,2
1,5	24,8	23,28	6,1
1,75	29,1	28,09	3,5
2	34,2	34,06	0,4



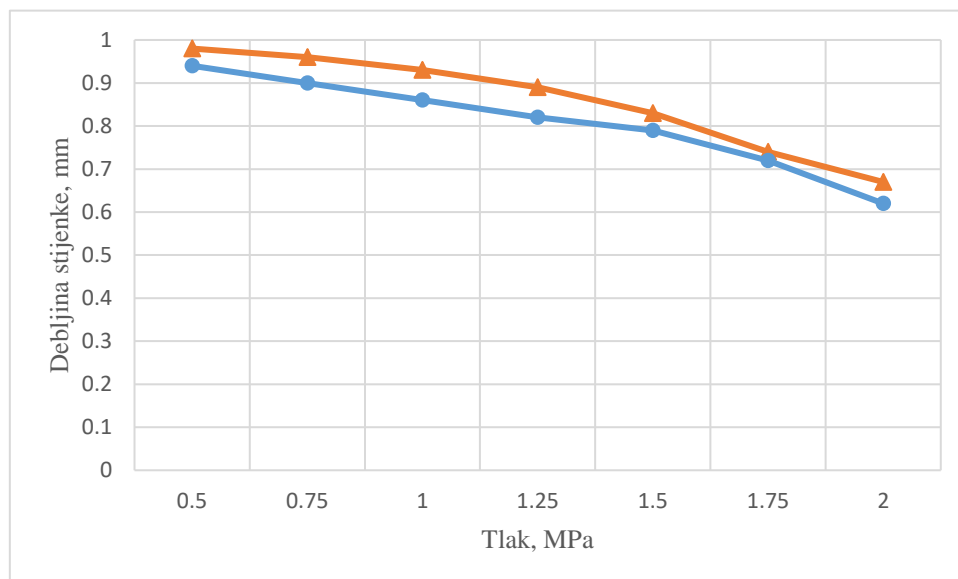
Slika 65. Usporedba visine ispuščenja dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom

Usporedba debljine ronđele dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom prikazana je u tablici 7. i na slici 66. Krivulja dobivena eksperimentalnom metodom prikazana je narančastom bojom i trokutima u točkama izmjerenih vrijednosti dok je krivulja dobivena numeričkom simulacijom prikazana plavom bojom i krugovima u točkama izmjerenih vrijednosti. Vidljivo je kako su vrijednosti dobivene numeričkom simulacijom manje od eksperimentalnih vrijednosti. Relativna razlika debljine ronđele između dvije metode u postotcima određena je izrazom:

$$\Delta s = \frac{s_{A, \text{eksp}} - s_{A, \text{num}}}{s_{A, \text{eksp}}} \cdot 100 \% \quad (7.3)$$

Tablica 7. Usporedba debljine ronđele dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom

p , MPa	$s_{A, \text{eksp}}$, mm	$s_{A, \text{num}}$, mm	Δs , %
0,5	0,98	0,94	4,1
0,75	0,96	0,90	6,3
1	0,93	0,86	7,5
1,25	0,89	0,82	7,9
1,5	0,83	0,79	4,8
1,75	0,74	0,72	2,7
2	0,67	0,62	7,5



Slika 66. Usporedba debljine stijenke dobivene eksperimentalnom i numeričkom metodom

8. ZAKLJUČAK

Posljednjih godina konkurencija između velikih industrijskih kompanija sve više se povećava. Ključ uspjeha je konstruirati i proizvesti proizvode zadovoljavajuće kvalitete u što kraćem vremenskom razdoblju a da pritom troškovi proizvodnje budu niski. Zbog toga se proces izrade proizvoda konstantno pokušava dovesti na višu razinu novim i poboljšanim postupcima oblikovanja materijala.

Proces hidrooblikovanja dokazao se kao dobra alternativa konvencionalnim postupcima oblikovanja kao što je prešanje i duboko vučenje u izradi proizvoda za autoindustriju koji se ističu složenom geometrijom. Proizvodi izrađeni ovim postupkom imaju uniformnu raspodjelu naprezanja, manju masu, veću strukturnu čvrstoću i krutost, bolju otpornost na udublјivanje, zadovoljavajuću kvalitetu površine i dimenzijsku točnost. Također je potreban manji broj operacija za izradu gotovog proizvoda eliminirajući time dodatne procese zavarivanja. Ako se uzmu u obzir navedene prednosti dolazi se do zaključka da je hidrooblikovanje proces za izradu kvalitetnih proizvoda, vrlo dobrih svojstava i ujedno ekonomski isplativ postupak.

U sklopu ovog diplomskog rada objašnjen je postupak hidrauličkog udublјivanja lima kao primjer pojednostavljenog procesa hidrooblikovanja, koji sadržava sve specifične elemente deformiranja i ponašanja materijala prilikom djelovanja tlaka fluida. Proveden je eksperiment hidrauličkog udublјivanja materijala Al 99,5 deblјine 1 mm prilikom čega su mjerene veličine bile visina ispupčenja i deblјina stijenke ronđele na polu A. Također je provedena trodimenzionalna računalna simulacija plastične deformacije ronđele, a usporedbom rezultata može se uočiti da su vrijednosti dobivene simulacijom vrlo blizu eksperimentalnim vrijednostima, primjerice za konačan tlak od 2 MPa relativna razlika rezultata iznosi 0,5 %. Prema tome može se reći da numerički model ronđele u simulaciji sa zadovoljavajućom točnošću prikazuje provedeno eksperimentalno hidrauličko udublјivanje lima deblјine 1 mm.

LITERATURA

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Bramah, pristupio 19.10.2019.
- [2] https://etc.usf.edu/clipart/61400/61439/61439_hydraulic.htm, pristupio 19.10.2019.
- [3] Singh H. Fundamentals of hydroforming. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers; 2003.
- [4] <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/news/hydroforming/vari-form-retires-historic-hydroforming-press>, pristupio 5.10.2019.
- [5] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID-CheckArticle&site-kts&NM-304>, pristupio 7.10.2019.
- [6] <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/hydroforming/introduction-to-tube-hydroforming>, pristupio 6.10.2019.
- [7] <https://www.salzgitter-hydroforming.de/en/technology/materials/>, pristupio 31.10.2019.
- [8] <https://www.metalcor.de/en>, pristupio 31.10.2019.
- [9] <https://www.makeitfrom.com/>, pristupio 31.10.2019.
- [10] <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/r-d-update-processes-for-hydroforming-sheet-metal-part-i>, pristupio 7.10.2019.
- [11] <https://americanhydroformers.com/what-is-hydroforming/>, pristupio 7.10.2019.
- [12] Altan T, Tekkaya A. Sheet Metal Forming – Processes and Applications. Ohio: ASM International; 2012.
- [13] Koç M. Hydroforming for Advanced Manufacturing. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited; 2008.
- [14] <http://www.precisionfluids.com/products/Hydroforming>, pristupio 20.10.2019.
- [15] Abrantes JP, Szabo-Ponce A, Batalha GF. Experimental and numerical simulation of tube hydroforming (THF). Journal of Materials Processing Technology. 164–165 (2005) 1140–1147. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.117
- [16] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID-CheckArticle&site-kts&LN-HU&NM-363>, pristupio 10.10.2019.
- [17] <https://www.solidsmack.com/fabrication/behind-the-design-mokumono-bicycles/>, pristupio 10.10.2019.

- [18] [https://www.tatasteleurope.com/static_files/StaticFiles/Automotive/Tube%20Hydro for ming%20in%20Automotive%20Applications.pdf](https://www.tatasteleurope.com/static_files/StaticFiles/Automotive/Tube%20Hydro%20forming%20in%20Automotive%20Applications.pdf), pristupio 12.10.2019.
- [19] <http://www.roadster.blog/2013/08/roadster-chassis.html>, pristupio 12.10.2019.
- [21] <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/r-d-update-sheet-hydroforming>, pristupio 12.10.2019
- [21] <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/r-d-update-processes-for-hydroforming-sheet-metal-part-ii>, pristupio 13.10.2019.
- [22] <https://quintustechnologies.com/knowledge-center/data-sheet-fluid-cell-type-presses-type-qfc-us/>, pristupio 20.10.2019.
- [23] <http://www.jmpforming.com/hydroforming/hydroforming-process.htm>, pristupio 13.10.2019.
- [24] <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/hydroforming/hydroforming-of-passenger-car-fuel-tanks>, pristupio 13.10.2019.
- [25] <http://www.boronextrication.com/2012/11/08/2013-ford-fusion-body-structure-hydroformed/>, pristupio 13.10.2019.
- [26] Baosheng L, Lihui L, Yuansong Z, Jianguo L. Forming characteristic of sheet hydroforming under the influence of through-thickness normal stress. Journal of materials Processing Technology. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.021 2012
- [27] Yadav A. Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming [dissertation]. School of The Ohio State University; 2008.
- [28] Palaniswamy H. Determination of process parameters for stamping and sheet hydroforming of sheet metal parts [dissertation]. School of The Ohio State University; 2007.
- [29] <https://quintustechnologies.com/metal-forming/products/application-support/>, pristupio 16.10.2019.
- [30] <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/metal-hydroforming/>, pristupio 15.10.2019.
- [31] <https://www.schnupp.com/products-services/presses-lifting-frames/ahu>, pristupio 15.10.2019.

- [32] https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen/blechumformung_tiefziehen_hydraulisches_tischkissen/index.html, pristupio 15.10.2019
- [33] <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/hydroforming/a-survey-of-presses-for-hydroforming-tubes-extrusions>, pristupio 15.10.2019.
- [34] <https://americanhydroformers.com/capabilities/hydroform-presses/>, pristupio 5.10.2019.
- [35] <https://www.youtube.com/watch?v=Tw4doBHViQc>, pristupio 15.10.2019.
- [36] <https://www.youtube.com/watch?v=vMwi5UBCCM0>, pristupio 16.10.2019.
- [37] <https://www.youtube.com/watch?v=Efo2znmzW6Y> pristupio 16.10.2019.
- [38] <https://quintustechnologies.com/metal-forming/products/deep-draw-hydroforming-presses/>, pristupio 16.10.2019.
- [39] <http://tsgsite.stevensadv.com/companies/mts>, pristupio 10.11.2019.
- [40] [https://hr.wikipedia.org/wiki/PLC_\(ra%C4%8Dunalo\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/PLC_(ra%C4%8Dunalo)), pristupio 26.10.2019.
- [41] Škunca M. Modificirano hidraulično udublivanje na sferi [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009.
- [42] Alfrević I. Linearna analiza konstrukcija. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 1999.
- [43] Povrzanović A. Obrada metala deformiranjem. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 1996.
- [44] Math M. Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2003.
- [45] <https://caeai.com/blog/understanding-geometric-nonlinearities>, pristupio 14.11.2019.
- [46] https://en.wikipedia.org/wiki/Tangent_modulus, pristupio 14.11.2019.

PRILOZI

1. CD-R disk