

# Razvoj kalupa za injekcijsko prešanje manžete od kaučukove smjese

---

**Andabaka, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:975291>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Andabaka**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Filip Andabaka

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Damiru Godecu, dipl. ing. na pomoći i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se tvrtki *Gumiimpex-GRP d.o.o.* na pomoći pri izradi praktičnog i eksperimentalnog rada. Također, zahvaljujem se svim djelatnicima koji su ustupili svoje vrijeme i znanje kako bi mi pomogli, te posebno Matiji Rožiću mag. ing. mech. na poticaju i podršci.

Veliko hvala mojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci.

Filip Andabaka



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Andabaka** JMBAG: **0035214915**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj kalupa za injekcijsko prešanje manžete od kaučukove smjese**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of mould for injection moulding of cufflink from rubber**

Opis zadatka:

Injekcijsko prešanje najvažniji je postupak prerade polimernih materijala općenito. Kada je riječ o preradi kaučukovih smjesa (elastomera), češće se primjenjuju postupci izravnog ili posrednog prešanja, no kada otpresak ima kompleksniji geometrijski oblik i kada su definirane uže tolerancije oblika i dimenzija otpreska, injekcijsko prešanje ima svoje prednosti.

U teorijskom dijelu završnog rada potrebno je opisati sustav za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa te usporediti ubrizgavalice i kalupe za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa s onima, uobičajenim za injekcijsko prešanje plastomera. Također je potrebno definirati osnovne korake razvoja kalupa za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa. U praktičnom dijelu rada, potrebno je prikazati razvoj kalupa za injekcijsko prešanje manžete od etilen/propilen/dienskog kaučuka (EPDM).

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. KAUČUKOVE SMJESE .....	3
2.1. Osnovni pojmovi.....	3
2.2. Vrste kaučuka.....	4
2.3. Dodaci kaučukovim smjesama.....	9
2.4. Smješavanje kaučukovih smjesa.....	11
3. PRERADBENA SVOJSTVA KAUČUKOVIH SMJESA.....	13
3.1. Karakteristike umrežavanja.....	13
3.2. Svojstava tečenja.....	15
3.3. Toplinska svojstva.....	15
4. INJEKCIJSKO PREŠANJE KAUČUKOVIH SMJESA .....	17
4.1. Sustav za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa .....	18
4.1.1. Preše za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa .....	20
4.1.1.1. Ubrizgavalica .....	21
4.1.1.2. Sustav za temperiranje .....	24
4.1.2. Kalup.....	25
4.1.2.1. Zadaci kalupa .....	26
4.1.2.2. Kalupna šupljina .....	27
4.1.2.3. Uljevni sustav.....	29
4.1.2.4. Sustav za odzračivanje .....	33
4.1.2.5. Sustav za vođenje i centriranje .....	34
4.2. Proizvodni proces injekcijski prešanih gumenih proizvoda .....	35
5. RAZVOJ KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE MANŽETE .....	39
5.1. Konceptijsko oblikovanje kalupa za injekcijsko prešanje manžete .....	41
5.2. Proračun kalupa za injekcijsko prešanje manžete .....	50
5.2.1. Reološki proračun kalupa.....	50
5.2.2. Toplinski proračun kalupa .....	52
5.3. Analiza rezultata proračuna i kalupa za injekcijsko prešanje manžete .....	58
6. ZAKLJUČAK.....	59
7. LITERATURA .....	60
PRILOG .....	61

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Prirodni kaučuk (NR) .....	6
Slika 2.	Stiren-butadienski kaučuk (SBR).....	7
Slika 3.	Etilen/propilen/dienski kaučuk (EPDM).....	7
Slika 4.	Akrilnitril/butadienski kaučuk (NBR).....	8
Slika 5.	Smješavanje na dvovaljku .....	11
Slika 6.	Smješavanje na gnjetilici.....	12
Slika 7.	Stupanj umreženja u ovisnosti o vremenu.....	14
Slika 8.	Funkcijska struktura sustava za injekcijsko prešanje polimera.....	19
Slika 9.	MAPLAN injekcijska preša .....	20
Slika 10.	REP injekcijska preša .....	21
Slika 11.	Primjeri uvlačnih zona ubrizgavalica .....	23
Slika 12.	Kućište kalupa .....	25
Slika 13.	Raspored kalupnih šupljina .....	27
Slika 14.	Tabela postotaka skupljanja smjese .....	28
Slika 15.	Elementi uljevnog sustav.....	29
Slika 16.	Poprečni presjeci uljevnih kanala.....	30
Slika 17.	Vrste ušća (a).....	31
Slika 18.	Vrste ušća (b).....	31
Slika 19.	Odzračivanje kalupa kroz kanale na sljubnici.....	33
Slika 20.	Primjer kanala za odzračivanje.....	33
Slika 21.	Elementi sustava za vođenje i centriranje .....	34
Slika 22.	Raspodjela viskoznosti i temperature duž cilindra za taljenje i kalupa.....	36
Slika 23.	Faze ciklusa injekcijskog prešanja kaučukovih smjesa.....	37
Slika 24.	Manžeta (izometrija) .....	39
Slika 25.	Manžeta (presjeci) .....	40
Slika 26.	Temeljne faze konstituiranja kalupa za injekcijsko prešanje polimera .....	40
Slika 27.	Faze koncipiranja kalupa za injekcijsko prešanje polimera .....	41
Slika 28.	Određivanje položaja otpreska u kalupu .....	42
Slika 29.	Tri kalupne šupljine u retku.....	43
Slika 30.	Dva reda kalupnih šupljina.....	43
Slika 31.	Uljevak .....	44
Slika 32.	Gornja kalupna ploča.....	44
Slika 33.	Uljevni kanali na gornjoj kalupnoj ploči .....	44
Slika 34.	Uljevni kanali na središnjoj kalupnoj ploči.....	45
Slika 35.	Uljevci u kalupne šupljine .....	45
Slika 36.	Ušća na jezgri .....	46
Slika 37.	Sustav za odzračivanje na donjoj kalupnoj ploči .....	46
Slika 38.	Sustav za vođenje i centriranje.....	47
Slika 39.	Kalup za injekcijsko prešanje manžete .....	47

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Podjela kaučuka po zasićenosti i polarnosti .....	5
Tablica 2. Proračunske dimenzije manžete i svojstva odabrane kaučukove smjese .....	48
Tablica 3. Proračunske dimenzije kalupa i svojstva odabranog čelika .....	49
Tablica 4. Karakteristike injekcijske preše.....	49
Tablica 5. Koeficijenti otpresaka.....	53



---

**POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

14022022	Manžeta
210608 (6673)	EPDM 6001 c
220101 (960-962)	EPDM 6001 c

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	/	Bezdimenzijska značajka
$A_O$	$m^2$	Površina otvorenog kalupa
$A_{slj}$	$m^2$	Površina sljubnice kalupa
$A_Z$	$m^2$	Površina zatvorenog kalupa
$a$	$W/m^2K$	Toplinska difuznost
$a_{10}$	/	Koeficijent otpreska
$a_{20}$	/	Koeficijent otpreska
$b$	mm	Širina
$b_K$	$Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$	Toplinska prodornost materijala kalupa
$b_T$	$Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$	Toplinska prodornost materijala taljevine
$c_p$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
$c_{pK}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet materijala kalupa
$c_{pT}$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet materijala taljevine
$d$	mm	Debljina
$d_K$	mm	Duljina kalupa
$d_s$	mm	Promjer segmenta uljevnog sustava
$d_u$	mm	Unutarnji promjer manžete
$d_{uljk}$	mm	Promjer uljevnog kanala
$d_{uljt}$	mm	Promjer uljevnog tuljca
$d_v$	mm	Vanjski promjer manžete
$F_d$	kN	Sila držanja kalupa
$F_{dMAX}$	kN	Maksimalna sila držanja kalupa
$h_K$	mm	Visina kalupa
$h_k$	mm	Visina konusnog dijela manžete
$h_{MAX}$	mm	Maksimalna visina kalupa
$h_{MIN}$	mm	Minimalna visina kalupa
$h_{uk}$	mm	Ukupna visina manžete
$k$	/	Faktor sigurnosti
$K_o$	/	Koeficijent oblika otpreska
$K_u$	/	Koeficijent unutrašnjosti otpreska
$l$	mm	Duljina
$l_0$	mm	Početna duljina
$l_s$	mm	Duljina segmenta uljevnog sustava
$l_{uljk}$	mm	Duljina uljevnog kanala
$l_{uljt}$	mm	Duljina uljevnog tuljca
$m$	kg	Masa
$m_g$	kg	Masa grozda

$n_{KŠ}$	/	Broj kalupnih šupljina
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Tlak
$p_k$	N/mm <sup>2</sup>	Tlak u kalupnoj šupljini
$p_u$	N/mm <sup>2</sup>	Tlak ubrizgavanja
$p_{uMAX}$	N/mm <sup>2</sup>	Maksimalni tlak ubrizgavanja
$p_{uMIN}$	N/mm <sup>2</sup>	Minimalni tlak ubrizgavanja
$Q$	kJ	Toplina
$q_v$	mm <sup>3</sup> /s	Volumni protok
$S_L$	%	Postotak skupljanja smjese
$S_M$	mm <sup>2</sup>	Projicirana površina manžete
$S_{uk}$	mm <sup>2</sup>	Projicirana površina uljevnih kanala
$s_0$	mm	Karakteristična izmjera manžete
$š_K$	mm	Širina kalupa
$T$	K	Temperatura
$T_D$	K	Dodirna temperatura
$T_g$	K	Temperatura staklišta
$T_K$	K	Temperatura stjenke kalupne šupljine
$T_O$	K	Temperatura okoline
$T_{OK}$	K	Temperatura otvaranja kalupa
$T_P$	K	Početna temperatura
$T_{PO}$	K	Temperatura postojanosti oblika
$T_T$	K	Temperatura taljevine
$T_{VK}$	K	Temperatura vanjske stjenke kalupa
$t_c$	s	Vrijeme proizvodnog ciklusa
$t_p$	s	Pomoćno vrijeme
$t_u$	s	Vrijeme ubrizgavanja
$t_{umr}$	s	Vrijeme umrežavanja
$V$	mm <sup>3</sup>	Volumen
$V_g$	mm <sup>3</sup>	Volumen grozda
$V_M$	mm <sup>3</sup>	Volumen manžete
$V_{uMAX}$	mm <sup>3</sup>	Maksimalni volumen ubrizgavanja
$V_{UK}$	mm <sup>3</sup>	Volumen uljevnih kanala
$V_{US}$	mm <sup>3</sup>	Volumen uljevnog sustava
$V_{UT}$	mm <sup>3</sup>	Volumen uljevnih tuljaca
$v$	m/s	Brzina
$v_{uMAX}$	m/s	Maksimalna brzina ubrizgavanja
$v_{uMIN}$	m/s	Minimalna brzina ubrizgavanja
$\alpha$	K <sup>-1</sup>	Toplinska rastezljivost
$\alpha_{ef}$	W/m <sup>2</sup> K	Efektivna toplinska difuznost
$\alpha_k$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent konvektivnog prijelaza topline
$\gamma$	K <sup>-1</sup>	Toplinska širljivost

---

$\Delta p_{uljk}$	N/mm <sup>2</sup>	Pad tlaka u uljevnim kanalima
$\Delta p_{uljt}$	N/mm <sup>2</sup>	Pad tlaka u uljevnim tuljcima
$\Delta p_{us}$	N/mm <sup>2</sup>	Pad tlaka u uljevnom sustavu
$\varepsilon_K$	/	Korigirani emisijski faktor čelika
$\varepsilon_{n\check{c}}$	/	Emisijski faktor čelika u smjeru normale
$\eta_T$	Pas	Dinamička viskoznost taljevine
$\lambda$	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti
$\lambda_K$	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti materijala kalupa
$\lambda_T$	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti materijala taljevine
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$\rho_K$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća materijala kalupa
$\rho_T$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća materijala taljevine
$\sigma$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	Stefan-Boltzmanova konstanta
$\phi_k$	W	Toplinski tok izmijenjen konvekcijom
$\phi_O$	W	Toplinski tok izmijenjen s okolinom
$\phi_{ost}$	W	Ostali gubici izmjene topline
$\phi_{ST}$	W	Toplinski tok izmijenjen sa sustavom za temperiranje
$\phi_T$	W	Toplinski tok izmijenjen s taljevinom
$\phi_{zr}$	W	Toplinski tok izmijenjen zračenjem

---

**SAŽETAK**

Ovaj rad opisuje razvoj kalupa za injekcijsko prešanje kaučukove smjese. Dan je uvid u najvažnije vrste kaučuka, dodatke kaučukovim smjesama i postupke smješavanja. Opisana su preradbena svojstva kaučukovih smjesa, tijekom reakcije umrežavanja i vulkanizacije te sustav za injekcijsko prešanje. U praktičnom dijelu rada, konceptijski je oblikovan kalup za injekcijsko prešanje manžete, a dimenzioniranje kalupa provodi se izradom reološkog i toplinskog proračuna. Temeljem analize rezultata proračuna, donosi se zaključak o parametrima prerade i konstrukciji kalupa za injekcijsko prešanje gumene manžete.

Pri razvoju konstrukcije kalupa za injekcijsko prešanje manžete korišten je programski paket *Solidworks2020*.

Ključne riječi:

kaučuk, kaučukova smjesa, guma, umrežavanje, vulkanizacija, preradbena svojstva, injekcijsko prešanje, sustav za injekcijsko prešanje, kalup, reološki proračun, toplinski proračun

---

**SUMMARY**

This paper describes the development of an injection mould for rubber compounds. An overview of the most important caoutchouc types, additives to rubber compounds, and mixing procedures is given, as well as the description of processing properties, the course of vulcanization and reaction of cross-linking, and the injection moulding system. In the practical part of the paper, the injection mould for cufflinks is designed, and dimensions are defined through rheological and thermodynamic calculations. Based on the analysis of the calculated results, a conclusion is formed about the processing parameters and the construction of the injection mould for rubber cufflinks.

The design of the injection mould for cufflinks was developed by using *Solidworks2020* software.

**Key words:**

caoutchouc, rubber compound, rubber, cross-linking, vulcanization, processing properties, injection moulding, injection moulding system, mould, rheological calculation, thermodynamic calculation

## 1. UVOD

Polimeri su materijali izuzetnih svojstava i posebne namjene. U polimerne materijale ubrajaju se plastomeri, elastomeri i duromeri, a svaku od navedenih vrsta karakterizira posebnost ponašanja pri temperaturi okoline i pri povišenim temperaturama. Plastomerni materijali pokazuju plastično ponašanje, odnosno određena vrijednost naprezanja uzrokuje deformaciju koja ne iščezava po prestanku djelovanja naprezanja. Plastično ponašanje plastomera navelo je korisnike da ih nazivaju plastikom, a analogno tome, za elastomerne se materijale često upotrebljava naziv guma. Guma ili elastomerni materijal istoznačan je naziv koji se koristi za polimere koje karakterizira svojstvo iščezavanja deformacija po prestanku djelovanja naprezanja (elastičnost). Ipak, nužno je razlikovati pojmove elastomer, guma, kaučuk, kaučukova smjesa, umrežavanje i vulkanizacija.

Važnost kaučuka kao osnove za pripremu gumenih proizvoda spoznali su još drevni narodi s područja Južne i Srednje Amerike. Oni su zarezivanjem drveta dobivali prirodni kaučuk koji su nazvali *Caa-o-chu* što znači „drvo koje plače“. Osim odjeće i obuće, izrađivali su i gumene loptice za igru. U Europi, tek početkom prve industrijske revolucije, započinje prerada kaučuka u svrhu dobivanja gumenih proizvoda. Za znatan napredak u preradi kaučuka zaslužan je Charles Goodyear koji je 1839. godine otkrio da se omekšani prirodni kaučuk može zagrijavanjem i uz prisutnost sumpora prevesti u elastični materijal – gumu. Od tada pa do danas traje razvoj postupaka prerade kaučuka u gumene proizvode.

Za proizvodnju gumene tvorevine je nužno poznavati medij u kojem će tvorevina izvršavati predviđenu namjenu te pri kojim uvjetima stoga je važno odabrati postojanu vrstu kaučuka koja nakon smješavanja s dodacima tvori sirovac. Sirovac, odnosno kaučukova smjesa predstavlja tvar iz koje se postupkom umrežavanja u vulkanizacijskom ciklusu dobiva gumeni proizvod. Preradbena svojstva uvelike ovise o recepturi kaučukove smjese i postupku smješavanja, a njihovo je poznavanje ključno za ispravno vođenje procesa prerade koji mogu biti kontinuirani ili ciklički.

Injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa je ciklički postupak prerade kojim se dobivaju gumeni proizvodi. Središnji element sustava za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa je kalup u koji se ubrizgava kaučukova taljevina. Potrebno je osigurati pravilno tečenje taljevine kalupom i potpuno ispunjavanje kalupne šupljine u kojoj se taljevina umrežava u gumeni proizvod. Za proizvodnju ispravnih gumenih tvorevina nužno je ispravno funkcioniranje svih

elementa sustava za injekcijsko prešanje, kao i pravilno vođenje procesa podešavanjem parametara prerade. Metodičkim pristupom u razvoju kalupa za injekcijsko prešanje moguće je oblikovati elemente kalupa, te analitički odrediti parametre prerade. Razvoj suvremenih programskih paketa koji numeričkim metodama opisuju proces injekcijskog prešanja uvelike je olakšao ispravno konstruiranje kalupa i određivanje parametara prerade.

Danas većinu gumenih tvorevina čine pneumatici. Uz njih se proizvode i mnogi drugi gumeni proizvodi zastupljeni u medicini, autoindustriji, proizvodnji vodovodnih i električnih instalacija te širokoj potrošnji. Injekcijskim prešanjem proizvode se gumene tvorevine poput brtvi, *O*-prstenova, manžeta, membrana, potplata, obloga i slično.

Posljednjih je godina povećana briga za zaštitu okoliša nametnula potrebu konačnog zbrinjavanja odbačenih gumenih tvorevina, iako one nisu najveći dio ni po obujmu ni po masi otpada. Cilj ekologa i gospodarstvenika je povisiti iskoristivost odbačenih gumenih tvorevina materijalnim, kemijskim i energijskim recikliranjem.



## 2. KAUČUKOVE SMJESE

### 2.1. Osnovni pojmovi <sup>[3]</sup>

#### Elastomer <sup>[1],[2]</sup>

Elastomeri su umjetni polimerni materijali koji imaju međusobno labavo vezane makromolekule. Elastomeri se dobivaju vulkanizacijom (tj. kemijskim postupkom umrežavanja) iz plastomerne smjese. Uvijek su amorfni, a pri temperaturi okoliša su gumasto-elastični što znači da manja naprezanja uzrokuju značajne deformacije, no karakterizira ih svojstvo iščezavanja deformacija neposredno nakon prestanka djelovanja naprezanja. Pri niskim temperaturama elastomeri postaju kruti i krhki, dok pri povišenim temperaturama pokazuju dodatno elastično ponašanje, sve do postizanja temperaturne vrijednosti na kojoj započinje proces razgradnje.

#### Kaučuk <sup>[3]</sup>

Kaučuk je neumrežena, ali umreživa polimerna tvar s entropijski elastičnim svojstvima pri sobnoj temperaturi. Pri višoj temperaturi i/ili pri djelovanju sile deformiranja, kaučuk počinje viskozno teći, tako da se pri povoljnim uvjetima može preoblikovati. Kaučuk je osnova pri proizvodnji elastomera (gume).

#### Umrežavanje <sup>[3]</sup>

Pod pojmom umrežavanje podrazumijeva se kemijsko fizikalna promjena pri kojoj pretežno plastični kaučuk prelazi u gumasto-elastično (ili čvrsto gumasto-elastično) stanje. Iako kemijska reakcija tijekom umrežavanja nije razjašnjena u potpunosti, smatra se da dolazi do stvaranja mostova (veza) između pojedinih makromolekula na reakcijski sposobnim mjestima. Nekada se umrežavanje zamjenjuje pojmom vulkaniziranje, no pod tim se pojmom, uz umrežavanje, podrazumijeva i postupak preradbe. Za umrežavanje je potrebno umrežavalo, a najkorištenije i najpoznatije jest sumpor koji je moguće koristiti s kaučucima koji posjeduju dvostruke veze, dok se za umrežavanje zasićenih kaučuka koriste organski peroksidi i dr. Umrežavanje se provodi pri povišenoj temperaturi (130-180°C) u određenom vremenskom intervalu.

## Guma <sup>[3]</sup>

Guma i elastomerni materijal istoznačni su pojmovi. Gume su do temperature razgradnje umreženi polimerni materijali koji su pri nižim temperaturama kruti i kruti poput stakla. Pri visokim temperaturama ne pokazuju viskozno tečenje, dok se u području sobne temperature pa do temperature razgradnje ponašaju gumasto, tj. elastično.

### 2.2. Vrste kaučuka <sup>[3]</sup>

Zadatak kaučuka u tvorbi kaučukovih smjesa jest da obavije sve dodatke, pri čemu vrsta upotrijebljenog kaučuka određuje temeljna svojstva gotovog gumenog proizvoda. Temeljnim svojstvima mogu se smatrati postojanost, (otpornost na) starenje, savitljivost pri nižim temperaturama te ponašanje pri utjecaju različitih medija (npr. voda, ulje, otapala). Kako vrsta kaučuka određuje i vrijednosti mehaničkih svojstava (npr. čvrstoća, elastičnost), promjena ili poboljšavanje svojstava postiže se uporabom mnogih dodataka pri smješavanju kaučukovih smjesa. Međutim, promjena svojstava moguća je samo do određene granice.

Različite vrste kaučuka podijeljene su prema ISO-normi 1629 u sedam skupina označenih slovima M, N, O, R, Q, T i U.

Skupina M: kaučuci sa zasićenim polimernim lancima, koji se zasnivaju na polimetilenu.

Skupina N: kaučuci s atomima dušika u polimernom lancu.

Skupina O: kaučuci s atomima kisika u polimernom lancu.

Skupina R: kaučuci s nezasićenim polimernim lancima.

Skupina Q: kaučuci sa silicijem u polimernom lancu.

Skupina T: kaučuci s atomima sumpora u polimernom lancu.

Skupina U: kaučuci s atomima ugljika, kisika i dušika u polimernom lancu.

Sintetski kaučuci mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine:

- **univerzalni**, koji se rabe u proizvodnji pneumatika i masovnih tehničkih proizvoda i
- **specijalni**, koji su razvijeni za posebne tehničke primjene.

Skupini univerzalnih kaučuka pripadaju npr. NR, SBR, BR i IR. U skupinu specijalnih kaučuka ubrajaju se npr. EPDM, NBR, CR, EPM, ACM i Q kaučuci. Specijalni kaučuci dobiveni su da bi se zadovoljili zahtjevi za povišenom otpornošću na gorenje, ulja, ozon, atmosferilije i sl.

Prema polarnosti polimernog lanca, kaučuci se dijele u dvije skupine:

- **nepolarni**,
- **polarni**.

Nepolarni kaučuk je čisti ugljikovodik i ne sadrži polarne skupine dok polarni kaučuci u svojoj molekuli, osim C i H, imaju i druge atome npr. Cl i F, ili atomne skupine npr. -CN, -COOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>. Na utjecaj benzina i mineralnih ulja, gumene tvorevine na bazi polarnih kaučuka obično su postojanije od onih na bazi nepolarnih kaučuka.

Prema zasićenosti polimernog lanca, kaučuci se dijele u dvije skupine:

- **zasićene,**
- **nezasićene.**

U nastavku je dana podjela kaučuka prema polarosti i zasićenosti.

**Tablica 1. Podjela kaučuka prema zasićenosti i polarosti <sup>[3]</sup>**

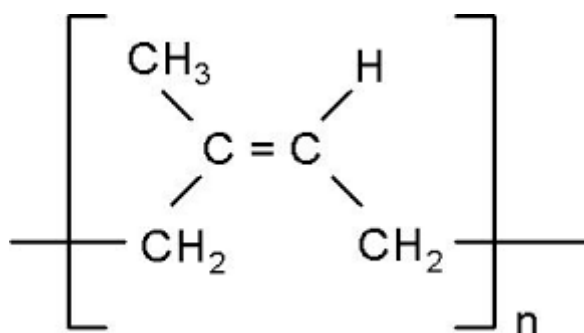
Kaučuci				
Nepolarni			Polarni	
nezasićeni	slabo-nezasićeni	zasićeni	nezasićeni	zasićeni
NR	IIR	EPDM	NBR	CM, CSM
SBR	BIIR	EPM	CR	ACM
IR	CIIR	PE-X		E/VAC
BR				FPM
PNR				MQ, MVQ, MPQ, MFQ
				AU, EU
				CO, ECO
				GPO
				T

U praksi proizvođača gumenih proizvoda najčešće se koriste NR, SBR, EPDM te NBR, stoga je u nastavku dan detaljniji pregled tih vrsta kaučuka.

Prirodni kaučuk (NR) <sup>[3]</sup>

Prirodni kaučuk dobiva se iz lateksa određenih biljaka među kojima se *Hevea brasiliensis* ističe kao najvažnija stablašica. Lateks se dobiva zarezivanjem kore drveta, a može sadržavati oko 35% kaučuka. Prirodni kaučuk je visoko-molekularni ugljikovodik (cis-1,4-polimerizat izoprena), sadrži male količine proteina, ugljikohidrata, mineralne soli i masne kiseline koji poput prirodnih ubrzavala i antioksidansa daju kaučuku svojstva koja nema čisti ugljikovodik. Prije postupka smješavanja, potrebna plastičnost kaučukove smjese postiže se masticiranjem. Kaučukove smjese na bazi prirodnog kaučuka između ostalog sadrže i punila, ojačala, omekšavalo, dodatke za sprječavanje starenja, umrežavalo i ubrzavalo. Te smjese moguće je umrežiti elementarnim sumporom, tiuramdisulfidima ili organskim peroksidima.

Gumene tvorevine na osnovi NR kaučuka postoje su na utjecaj vode, alkohola, glikola, silikonskih ulja i masti, a nepostojane su na utjecaj mineralnih ulja i masti, alifatske i aromatske te klorirane ugljikovodike. Primjenjuju se u proizvodnji transportnih traka, remenja, brtvi membrana, rukavica i sl.

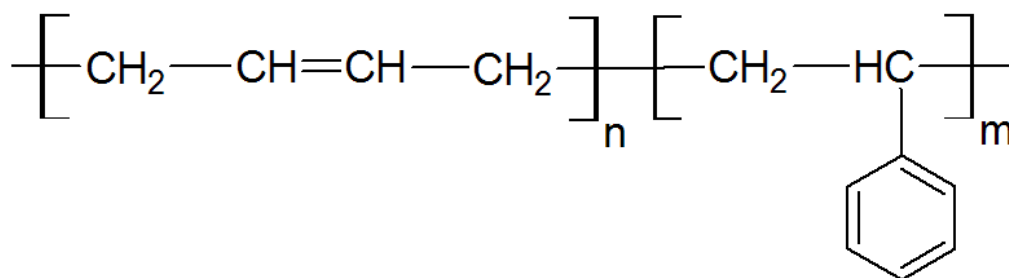


Slika 1. Prirodni kaučuk (NR) <sup>[10]</sup>

Stiren-butadienski kaučuk (SBR) <sup>[3]</sup>

SBR je najprošireniji sintetski kaučuk koji u pravilu sadrži 23,5% stirena, a prije smješavanja nije ga potrebno masticirati. Smjese na osnovi ovog kaučuka sadrže punila, omekšavalo, umrežavalo, ubrzavalo i ojačala bez kojih bi gumeni proizvodi imali niska mehanička svojstva. Omekšavalo je obično mineralno ulje, a ubrzavalo može biti sumpor, tiuramsulfid ili peroksid. Uporabom ojačala postižu se vrijednosti mehaničkih svojstava poput onih kod prirodnog kaučuka, uz manju trošivost te veću toplinsku postojanost i otpornost na starenje, ali i nižu elastičnost i savitljivost pri nižim temperaturama. Najveći dio SBR kaučuka proizvodi se emulzijskom polimerizacijom.

Gotovo dvije trećine smjesa dobivenih na osnovi SBR kaučuka koristi se u proizvodnji pneumatika, dok se ostatak koristi za proizvodnju đonova, plašteve kabela, brtve, podne obloge i sl.

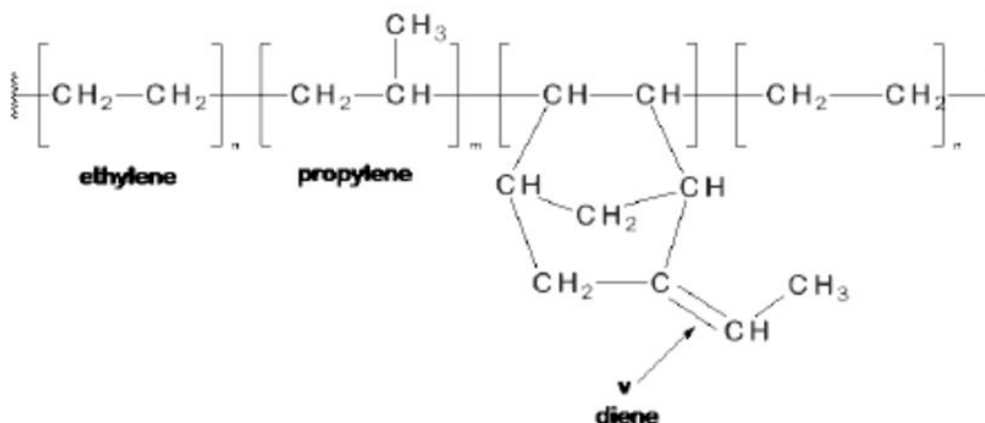
Slika 2. Stiren-butadienski kaučuk (SBR) <sup>[11]</sup>Etilen/propilen/dienski kaučuk (EPDM) <sup>[3]</sup>

EPDM jest terpolimer koji čine tri monomera: etilen, propilen i jedan dien. Najčešće se primjenjuju dieni:

- heksadien,
- diciklopentadien,
- etilidennobornen.

Postojanost pri utjecaju ozona uzrokovana je postojanjem dvostruke veze u postranim lancima. Smjese na osnovi EPDM kaučuka mogu biti s uljem ili bez ulja, a u pravilu su sastavljene od ojačala, punila, omekšavala (mineralno ulje), umrežavala (sumpor, peroksidi) i ubrzavala. Zbog malog broja dvostrukih veza, umrežavanje sumporom je sporo, pa se umrežuje pri visokim temperaturama uz primjenu ubrzavala. Umrežavanje peroksidima primjenjuje se kod zahtijevane toplinske postojanosti gumenih tvorevina.

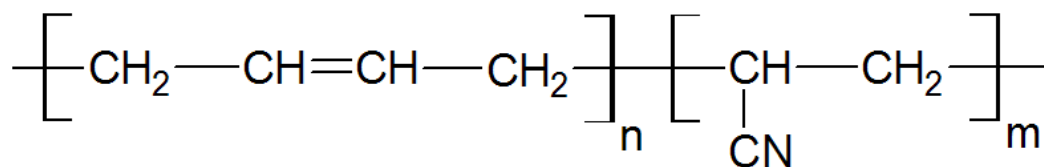
Gumene tvorevine dobivene na osnovi EPDM kaučuka postojane su na utjecaj topline, starenje i agresivne medije, posjeduju dobru elastičnost, a primjenjuju se za izradu brtvenih profila, gipkih cijevi, manžeta i za plašteve kabela.

Slika 3. Etilen/propilen/dienski kaučuk (EPDM) <sup>[12]</sup>

Akrilnitril/butadienski kaučuk (NBR) <sup>[3]</sup>

Sve nezasićene vrste kaučuka na osnovi akrilnitril/butadiena nazivaju se nitrilni kaučuci, a dobivaju se emulzijskom lančanom polimerizacijom, dok je sadržaj akrilnitrila od 18 do 50%. Prema sadržaju akrilnitrila, smjese na osnovi NBR kaučuka mogu se podijeliti u pet skupina, pri čemu se s porastom udjela poboljšava postojanost na utjecaj benzina i mineralnih ulja, smanjuje se elastičnost, savitljivost pri niskim temperaturama i propusnost plinova, te povećava zaostala tlačna deformacija. Smjese su sastavljene od ojačala (čađa ili svijetla ojačala), omekšavala, umrežavala (sumpor), ubrzavala i aktivatora. Umrežavanje bez sumpora moguće je primjenom tiuramsulfida ili organskih peroksida, pri čemu se povisuje toplinska postojanost. Postojanost na utjecaj ozona i starenja postiže se dodacima i zaštitnim voskovima.

Gumene tvorevine dobivene na osnovi NBR kaučuka postojane su na utjecaj benzina, mineralnih masti i ulja, ali nisu postojane na starenje. Dodatkom ojačala postiže se čvrstoća slična onoj kod smjesa na osnovi prirodnog kaučuka, a izrađuju se brtve, membrane, gipke cijevi, transportne vrpce, potplate cipela, rukavice, plaštev i kablova i sl.



Slika 4. Akrilnitril/butadienski kaučuk (NBR) <sup>[13]</sup>

### 2.3. Dodaci kaučukovim smjesama <sup>[3]</sup>

#### Punila i ojačala

Punila i ojačala dodaju se kaučukovim smjesama kako bi se omogućila preradba smjese i postigla tražena svojstva gumenog proizvoda.

Kako bi se poboljšala svojstva gumenog proizvoda kao što su prekidna čvrstoća ili prekidno istezanje, koriste se ojačala. Čađa je najpoznatije ojačalo i najčešće se koristi. Uporabom čađe dobivaju se proizvodi crne boje, dok se za proizvode svijetle boje koriste ojačala poput kalcijeva silikata, magnezijeva karbonata ili silicijeva dioksida (anorganska ojačala), odnosno stirenske, kumaronске ili fenolne smole (organska ojačala).

Za poboljšavanje preradbenih svojstava kaučukove smjese i snižavanje cijene gumenog proizvoda, u kaučukovu smjesu dodaju se punila koja mogu biti: azbest, kalcijev karbonat, barijev sulfat, meki kaolin, magnezijev oksid, drveno brašno i sl.

#### Omekšavala

Omekšavala su tvari koje omogućuju lakše smješavanje kaučukove smjese tako da povisuju plastičnost smjese, smanjuju potrebnu energiju smješavanja, omogućuju razdiobu dodataka u smjesi, povisuju elastična svojstva gumenog proizvoda, njihovu savitljivost na nižim temperaturama, te utječu na sniženje cijene proizvoda. Doziranjem do 5% omekšavala poboljšava se preradljivost kaučukove smjese bez bitnog utjecaja na čvrstoću proizvoda, dok u većim količinama počinje bitno sniženje mehaničkih svojstava. Prema svrsi zbog kojeg se dodaju, dijele se na: elastifikatore, plastifikatore i dodatke za poboljšavanje konfekcijske ljepljivosti. Prema kemijskom sastavu omekšavala mogu biti: parafinska, naftenska, aromatska, eterska i esterska, polimerna i sl.

Najčešće korištena omekšavala su mineralna ulja, elastifiktori, faktisi, klorirana ugljikovodična kiselina i dr.

#### Dodaci za poboljšanje preradljivosti

U ove dodatke ubrajaju se smole (npr. kolofonij, kumaronove smole), sapuni (kalcij, cink stearat), voskovi (karnauba vosak), čisti ugljikovodici (polietilen, vazelin, parafin, ozokerit), masne kiseline (stearinska kiselina) i faktisi (proizvod polimerizacije nezasićenih ulja i masti sa sumporom ili klorsumporom).

### Dodaci za sprečavanje starenja

Organski spojevi u malim količinama (1%-3% na količinu kaučuka) mogu doprinijeti sprječavanju starenja gumenog proizvoda. Ovisno o zaštitnom djelovanju, razlikuju se antioksidansi, antiozonati, dodaci za produljenje trajnosti (svjetlosni stabilizatori), dodaci za smanjenje gorivosti i sl.

### Umrežavala

Umrežavala su elementi ili spojevi koji izazivaju umrežavanje kaučukove smjese. Još od Godyearovog otkrića, najpoznatije umrežavalo je sumpor, no njegova primjena moguća je s kaučucima koji posjeduju dvostruke veze u glavnom (NR, SBR, NBR) ili posrednom (EPDM) polimernom lancu. Osim navedenog, umrežavala mogu biti i tiuramsulfid, organski peroksidi i metalni oksidi.

### Ubrzavala i aktivatori

Kako bi se smanjila potrebna količina umrežavala i ubrzala reakcija umrežavanja, započela je primjena metalnih oksida (PbO, ZnO, MgO) kao ubrzavala, no njihovo djelovanje nije zadovoljavalo. Stoga je od velikog značaja bilo otkriće organskih ubrzavala poput 2-merkaptobenzotiazola ili dibenzotiazildisulfida, što je doprinijelo smanjenju potrebne količine umrežavala i povišenju kvalitete gumenog proizvoda.

Aktivatori su tvari koje dozirane u malim količinama znatno povisuju djelotvornost ubrzavala, a najčešće korišteni su ZnO i stearinska kiselina.

### Usporavala i mastifikatori

Zadaća usporavala je spriječiti reakciju predumrežavanja, ali ne i usporiti reakciju umrežavanja, stoga se dodaju u malim količinama, a najčešće se koriste salicilna kiselina, anhidrid ftalne kiseline, benzojeva kiselina i dr.

Mastifikatori imaju zadaću da povećaju plastičnost kaučukove smjese sniženjem molekulne mase i tako olakšaju smješavanje svih dodataka. Povećanje plastičnosti i smanjenje molekulne mase izaziva se oksidacijskom razgradnjom kaučuka, a ovisi o temperaturi i primjenjuje se samo u smjesama prirodnog kaučuka.



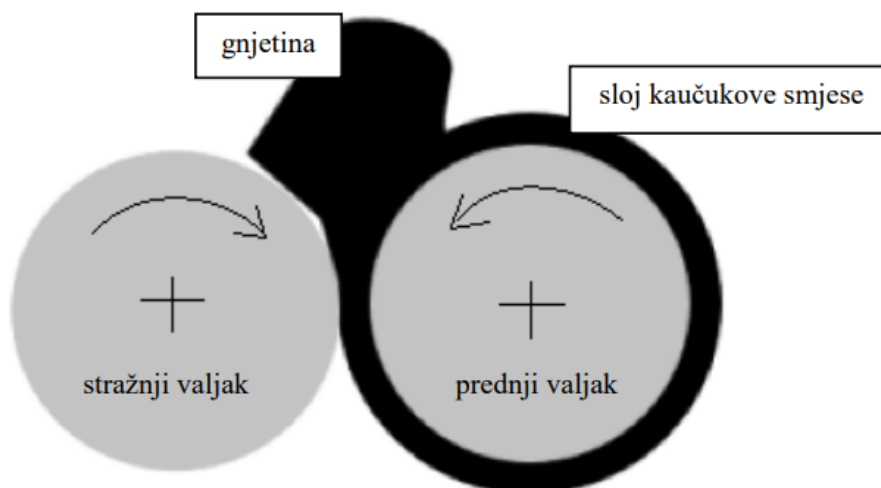
### Ostali sastojci kaučukovih smjesa

Pjenila, dodaci za sprječavanje neugodnog mirisa, za smanjenje gorivosti, za konzerviranje, za produljenje trajnosti proizvoda, upijala vlage (sikativi), regenerati i dr.

## 2.4. Smješavanje kaučukovih smjesa <sup>[3]</sup>

### Smješavanje na dvovaljku

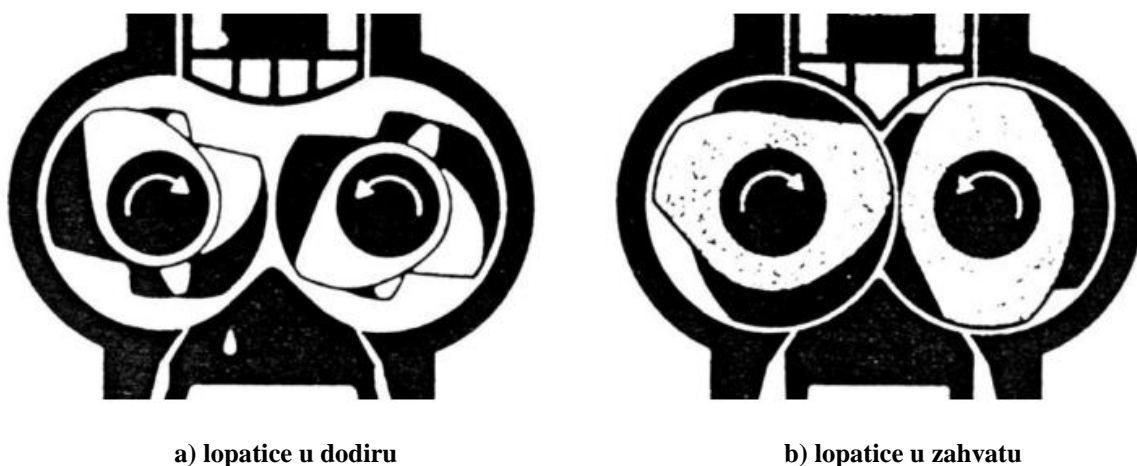
Dvovaljak se sastoji od dva vodoravno, jedan iza drugog, postavljena čelična valjka koji rotiraju u suprotnim smjerovima, različitim brzinama (tarno valjanje), prednji u odnosu na zadnji u omjeru 1:1,1-1:1,5. Moguće je podešavati razmak između valjaka koje je potrebno temperirati da temperatura smjese ne bi bila viša od 100°C, a do povišenja temperature smjese dolazi uslijed smičnog naprezanja kaučuka u rasporu uzrokovanog trenjem. Po podešavanju raspora među valjcima, u nj se stavlja kaučuk koji u obliku traka obuhvaća prednji valjak i rotira se s njime, potom se dodaci, prema recepturi, dodaju u gnjetinu kaučuka na ulazu u raspor. Povećanjem dodataka povećava se i raspor kako bi se na ulazu osigurala ista količina gnjetine tijekom smješavanja, koje u pravilu traje 30-45 minuta, po potrebi dulje. Dvovaljak je opremljen sigurnosnim sustavom kako valjci ne bi zahvatili ruke, a razvijena prašina i plinovi uklanjaju se s radnog mjesta ventilacijskim uređajima.



Slika 5. Smješavanje na dvovaljku <sup>[3]</sup>

### Smješavanje na gnjetilici

Kod gnjetilica, gnjetina se naizmjenično stlačuje i rasterećuje (gnjete) na lopaticama dvaju suprotno-rotirajućih rotora smještenih u temperiranoj komori, s namjenom priprave srednje-viskoznih i visoko-viskoznih smjesa kaučuka. Postoje dva tipa gnjetilica, kod onih s lopaticama u zahvatu postiže se značajna homogenost kaučukove smjese, dok se kod onih s dodirujućim lopaticama komora lakše prazni te smjesa bolje uvlači, a potrebna homogenost postiže se doradom na dvovaljku. Pojedini tipovi gnjetilica mogu imati pneumatski upravljani klip kojim se gnjetina stlačuje među lopaticama, što rezultira smanjenjem vremena potrebnog za smješavanje koje uobičajeno iznosi 4-8 min. Brzina vrtnje rotora, ovisno o veličini komore iznosi  $15 \text{ min}^{-1}$  -  $90 \text{ min}^{-1}$ , a kod tipova s lopaticama u dodiru u omjeru 1:1,1. Pri smješavanju na gnjetilici postižu se temperature smjese  $150\text{-}180^\circ\text{C}$  zbog čega je nužno temperiranje komore, gnjetilice i rotora, a ubrzavalo se takvoj smjesi ne dodaje kako bi se spriječilo predumrežavanje smjese.



Slika 6. Smješavanje na gnjetilici <sup>[3]</sup>

### 3. PRERADBENA SVOJSTVA KAUČUKOVIH SMJESA <sup>[3]</sup>

Prije početka izrade gumenog proizvoda nužno je upoznati se sa zahtjevima potrošača, kako bi se pri postupku preradbe kaučukove smjese pokušalo proizvesti gumeni proizvod zadanih svojstava. Gotovim gumenim proizvodom podrazumijeva se proizvod koji udovoljava svim ispitivanjima provedenim nad produktom postupka preradbe. Tijekom injekcijskog prešanja dolazi do fizičkih i kemijskih promjena kaučukove smjese, stoga značajnu pažnju valja dati preradbenim svojstvima još neumrežene kaučukove smjese.

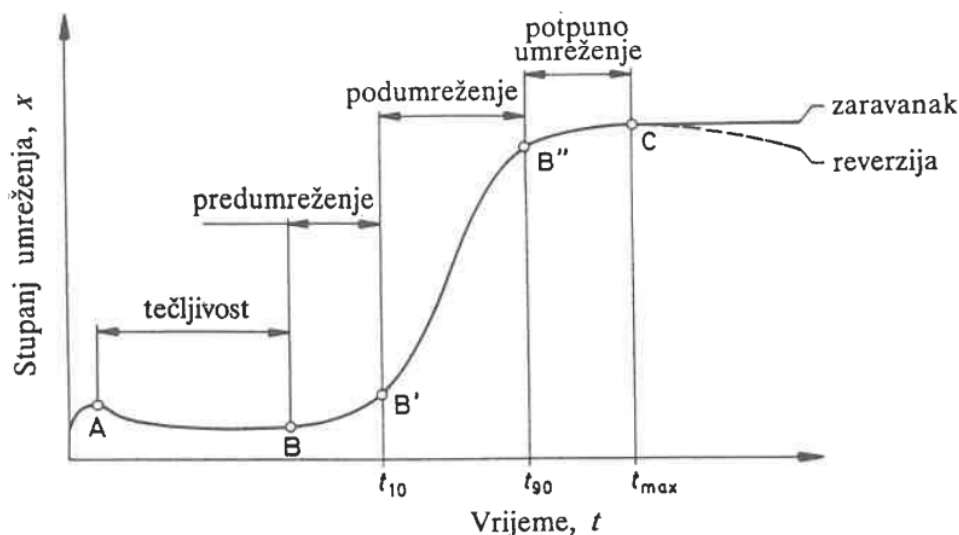
Preradbeni svojstva kaučukovih smjesa mogu se svesti pod:

- karakteristike umrežavanja,
- svojstva tečenja
- i toplinska svojstva.

Iako uspješnost postupka preradbe uvelike ovisi o preradljivosti neumrežene kaučukove smjese, važno je naglasiti da postoji znatna varijantnost svojstava od šarže do šarže. Kako je svaka smjesa zapravo mješavina znatnog broja sastojaka jasna je različitost preradbenih svojstava, no upravo zato važno je iskustvo proizvođača koje pomaže minimiranju broja probnih serija. Kako bi se proizvođačima olakšalo praćenje preradbenih svojstava i pronalaženje potrebnih uvjeta preradbe, postoje mnoge metode za ispitivanje pojedinih svojstava smjese. Tim metodama uglavnom se ispituju svojstva tečenja i/ili karakteristike umrežavanja, pa se u praksi često primjenjuju mjerni instrumenti poput kapilarnog reometra i MOONEY viskozimetra.

#### 3.1. Karakteristike umrežavanja <sup>[3]</sup>

Trajanje postupka preradbe kaučukove smjese ovisi o brzini umrežavanja kaučukove smjese. Opis ovisnosti stupnja umreženja u vremenu koji prikazuje **slika 7.** je od velikog praktičnog značenja. Vidljivo je kako se niski stupanj umreženja nastoji zadržati tijekom duljeg vremenskog perioda, te se u kraćem periodu nastoji postići potpuni stupanj umreženja. Stupanj umreženja kaučukove smjese važan je orijentir u proizvodnji gumenog proizvoda, a ovisi o svim preradbenim svojstvima smjese.

Slika 7. Stupanj umreženja u ovisnosti o vremenu <sup>[3]</sup>

- Faza tečenja (A-B) – obilježena je niskom viskoznošću kaučukove smjese koja olakšava tečenje smjese uljevnim sustavom i ispunjavanje kalupne šupljine
- Predumrežavanje (B-B') – faza u kojoj s povišenjem stupnja umreženja dolazi do povećanja viskoznosti, potrebno ju je odgoditi kako bi se osiguralo optimalno ispunjavanje kalupne šupljine
- Podumrežavanje (B'-B'') – faza obilježena značajnim rastom stupnja umrežavanja, a završava kada se postigne stupanj umreženja od 90%
- Potpuno umreženje (B''-C) – faza koja završava optimalnim stupnjem umreženja, odnosno maksimalno mogućim na što ukazuje zaravanak krivulje umrežavanja, pri čemu je poželjno je postići što duži zaravanak

*Reverzija* je faza koju je poželjno izbjeći, lako može biti rezultat nepravilnog postupka preradbe, a karakterizira je sniženje fizikalno-mehaničkih svojstava kao i stupnja umreženja.

### 3.2. Svojstva tečenja <sup>[3]</sup>

Važnost svojstava tečenja najlakše je spoznati pri injekcijskom prešanju gdje se tecljivu neumreženu kaučukovu smjesu pod djelovanjem tlaka i temperature putem uljevnog sustava injektira u kalupnu šupljinu. Iako trajanje takvog postupka može biti relativno kratko, konačni je produkt gumeni proizvod kojeg karakterizira pretežno elastično ponašanje.

Taj širok raspon ponašanja kaučukove smjese ovisi o temperaturi i brzini deformacije, a opisuju ga osnovne visko-elastične veličine na temelju kojih je moguće pretpostaviti mehanička i termodinamička svojstva gumenog proizvoda. Poznavanje osnovnih visko-elastičnih svojstava, koja znatno ovise i o toplinskim svojstvima, dovoljno je tek za predviđanje uporabnih svojstava.

Ističe se činjenica da su parametri preradbe rezultat kompromisa između dva suprotna zahtjeva dovoljno dugog vremena predumrežavanja i što kraćeg ukupnog vremena umrežavanja. Svojstva tečenja valja podesiti tako da ponašanje smjese bude pretežno viskozno tijekom svih predviđenih operacija preradbe kao što je popunjavanje kalupne šupljine, a zatim se u posljednjem koraku postupka preradbe nastoji postići potpun stupanj umreženja kaučukove smjese.

### 3.3. Toplinska svojstva <sup>[3]</sup>

Postupci preradbe polimera temelje se na zagrijavanju i hlađenju polimernog materijala kojeg se nastoji preko sustava za ubrizgavanje putem uljevnog sustava dovesti u kalupnu šupljinu. Već na samom početku procesa potrebno je postići odgovarajuće ponašanje smjese, kao i zahtijevanu temperaturu kalupa. U svakom sljedećem koraku prerade toplinsko stanje smjese tek dobiva na važnosti. Temperatura kalupa i smjese u cijelom postupku preradbe imaju velik utjecaj na stupanj umreženja i svojstva tečenja.

Pri proračunu izmjene topline naglasak se stavlja na dva čimbenika ukupno utrošenu energiju za promjenu stanja polimera i brzinu izmjene topline. Osnovni zadatak toplinskog proračuna svodi se na izračun temperatura tijekom vremena i njihov raspored unutar promatranog sustava. Toplinska bilanca sustava ovisi o brzini izmjene topline sustava s okolinom te brzini prijenosa topline unutar sustava.

Toplinska svojstva polimera izravno ovise o temperaturi i tlaku te udjelu dodataka u polimernom materijalu, a definicije najznačajnijih dane su u nastavku.

Toplinska širljivost je relativna promjena volumena u ovisnosti o promjeni temperature, a izračunava se:

$$\gamma = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (3.1.)$$

Specifičnim toplinskim kapacitetom određena je ovisnost unutrašnje energije o temperaturi:

$$c_p = \frac{dQ}{mdT} \quad (3.2.)$$

Toplinskom difuznošću opisana je brzina mijenjanja temperature tijela ili tijek širenja topline, računa se:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3.3.)$$

Toplinska rastezljivost je relativna promjena duljine tijela po jedinici promjene temperature, definirana kao:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \left( \frac{\Delta l}{\Delta T} \right) \quad (3.4.)$$

#### 4. INJEKCIJSKO PREŠANJE KAUČUKOVIH SMJESA <sup>[3]</sup>

Ciklički postupak preradbe polimera poznat pod nazivom injekcijsko prešanje jedan je od najproširenijih postupaka proizvodnje polimernih materijala. Iako se injekcijsko prešanje polimera primjenjuje od prve polovice dvadesetog stoljeća, a danas se tim postupkom prave gumeni proizvodi s donjom granicom mase od 0,5 g u izuzetno brzim proizvodnim ciklusima. Prema masi, najviše se proizvode gumene tvorevine u granicama od 10 g do 10 kg, no u praksi se koriste postrojenja za proizvodnju tvorevina mase veće od 100 kg. Injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa doživjelo je znatan napredak tijekom druge polovice prošlog stoljeća, kada je Francuz R. Quiellerya patentirao ubrizgavalicu s pužnim vijkom, koja je počela prevladavati u proizvodnji gumenih tvorevina. Injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa olakšano je rješavanjem problema automatskog vađenja otpresaka i samim prednostima postupka kao što su; kraće vrijeme umrežavanja, povišena kvaliteta proizvoda i izrada proizvoda kompleksne geometrije, jednostavno rukovanje opremom i uvođenjem elektronike.

Kako je brzi razvoj proizvodnog procesa donio potrebu poopćavanja utvrđena je sličnost injekcijskog prešanja polimera s tlačnim lijevanjem lakih i obojenih metala jer se u oba preradbeni procesa ubrizgava taljevina potrebne smične viskoznosti u kalupnu šupljinu. Važnost smične viskoznosti uvidio je R. Lenk, smatrajući je jedinstvenim parametrom koji opisuje sve tvari. Sustavnom tehnikom, kao glavnom temeljnicom sustavnog pristupa injekcijskom prešanju, smatra se određena količina misaonih modela, radnih postupaka i mnogih organizacijskih oblika. Godine 1777. J. Beckmann definirao je tehnologiju kao sveobuhvatnu znanost o isprepletenosti tehnike, gospodarstva i društva, a 1806. u *Entwurf der allgemeinen Technologie (Prijedlog opće tehnologije)* piše: „*Treba svrstati ukupnost pojedinih vrsta postupaka koji se javljaju u najrazličitijim zanatima u rubrike u odnosu na njihovu istu ili sličnu svrhu, pri čemu svaka skupina postupaka nudi slično sredstvo obrade, a vrsta materijala na koje se obrada primjenjuje je sporedna.*” Kibernetički pristup tome pridodaje opis fenomena svijeta tokovima tvari, energije i informacija te se dosad navedenim pristupima izvodi definicija injekcijskog prešanja polimera koja glasi: „***Injekcijsko prešanje (tlačno lijevanje) jest postupak praoblikovanja ubrizgavanjem tvari potrebne smične viskoznosti u temperiranu kalupnu šupljinu. Tvorevina (otpresak) očvršćuje u kalupnoj šupljini geliranjem i/ili hlađenjem, odnosno polimerizacijom (lančanjem) i/ili umrežavanjem, nakon čega se vadi iz kalupa.***”

#### 4.1. Sustav za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa <sup>[3],[4]</sup>

Za izradu gumenog otpreska nužno je radno mjesto na kojem se izvode određene operacije pomoću opreme, a potrebno je osigurati pravilnu dobavu elastomera i energije do radnog mjesta, odvesti gotove izratke te reciklirati otpad. Radno mjesto se nalazi unutar proizvodne linije koja čini cjelokupnu opremu potrebnu za pravljenje gumenih otpresaka. Dodatna oprema poput hvataljki, transportnih vrpca, manipulatora ili robota svakako povisuje efikasnost proizvodnje, no samo tehnološki nužna oprema čini **sustav za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa (SPIKS)**.

SPIKS, odnosno opremu za pravilno odvijanje proizvodnog procesa sačinjava oprema za pripremu kaučukove smjese, za odvijanje preradbenog procesa, obradnog procesa, procesa spajanja, oplemenjivanja i promjene svojstava izratka, a sačinjava ga:

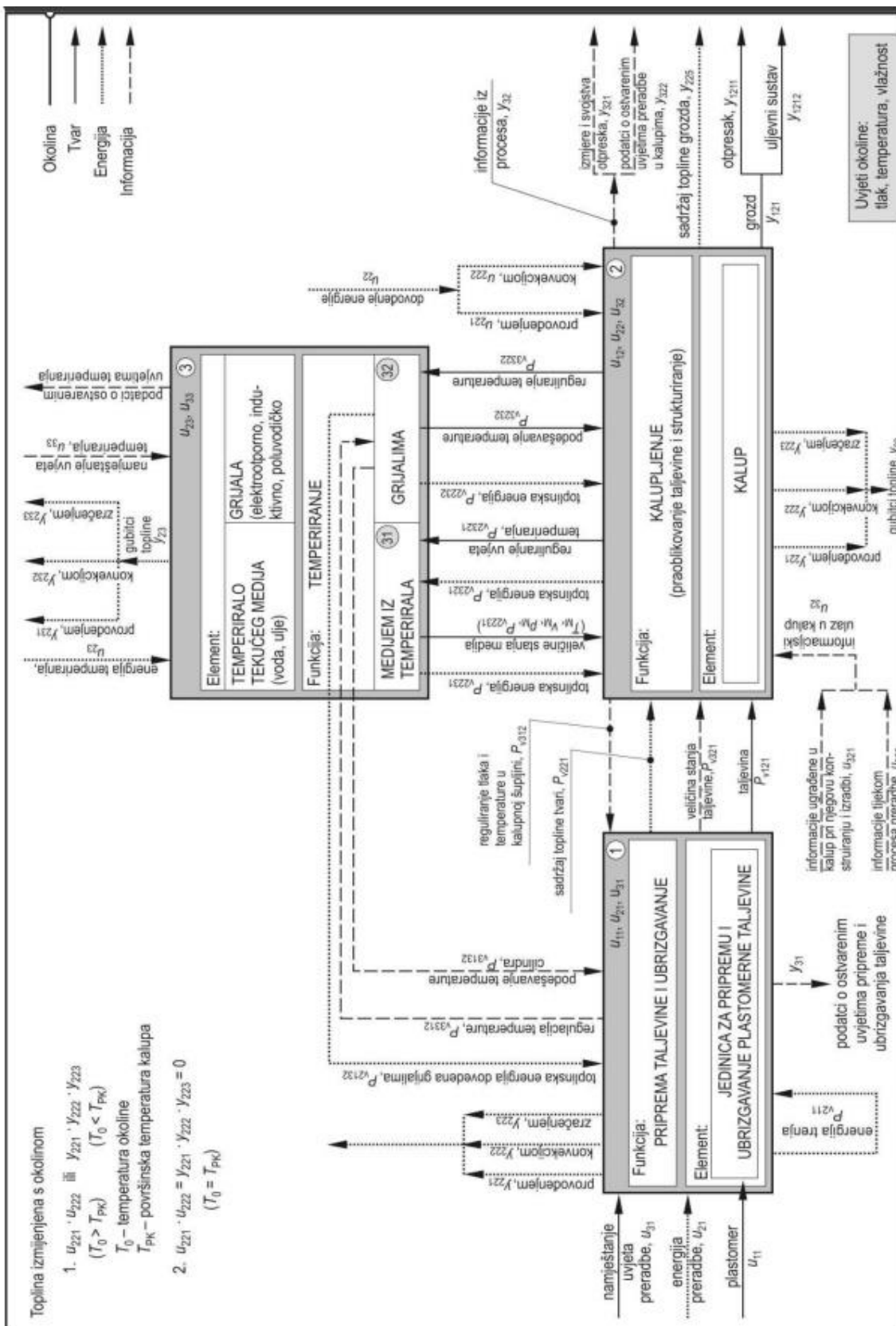
- ubrizgavalica,
- kalup
- i sustav za temperiranje.

Funkcijska struktura sustava za injekcijsko prešanje polimera dana na **slici 8.** prikazuje tokove materijala, energije i informacija kao i veze među elementima sustava. Prikazane su već spomenute funkcije procesa injekcijskog prešanja i sva potrebna oprema. Sustav opisuje veličine stanja na ulazu i izlazu procesa kao i promjene veličina među elementima sustava. Valja spomenuti kako se sustavi mogu razlikovati pa tako ne postoje svi oblici izmjene topline pri svim postupcima injekcijskog prešanja polimera, a osim značajnog utjecaja toplinskog stanja okoline, važan je informacijski ulaz u kalup koji čini velik broj pod-ulaza.

Proces injekcijskog prešanja tako je opisan s četiri funkcije;

- priprema tvari do potrebne smične viskoznosti i kalupa do potrebnog toplinskog stanja,
- ubrizgavanje taljevine u uljevni sustav i popunjavanje kalupne šupljine,
- kalupljenje potrebne količine taljevine pri utjecaju parametara prerade
- i temperiranje sustava za injekcijsko prešanje do postizanja zahtijevanog stupnja umreženja tvorevine.





Slika 8. Funkcijska struktura sustava za injekcijsko prešanje polimera [8]

#### 4.1.1. Preše za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa

Suvremene preše, korištene u proizvodnji injekcijski prešanih gumenih otpresaka, zapravo objedinjuju dva pod-sustava prikazana na funkcijskoj strukturi sustava za injekcijsko prešanje polimera, a to su ubrizgavalica i sustav za temperiranje. Oba pod-sustava bit će opisana u nastavku. Preše se prema karakteristikama jedinice za zatvaranje kalupa dijele na hidrauličke i mehaničke. Pri preradi kaučukovih smjesa jedinica za zatvaranje najčešće je postavljena okomito (horizontalna sljubnica), dok se pri preradi plastomera češće koriste preše kod kojih je jedinica za zatvaranje postavljena horizontalno (okomita sljubnica).

U praksi se najčešće koriste preše sa hidrauličkim zatvaranjem koje imaju tu prednost da sila držanja djeluje u središtu što ima povoljan efekt na tijek linije progiba nosača kalupa. Negativan tijek linije progiba očituje se kod polužnog zatvaranja mehaničkih preša pri čemu sila zatvaranja djeluje sa strane. Kako se kod većine kalupa za injekcijsko prešanje kaučukova smjesa ubrizgava kroz središnji dio kalupa, vrlo je važno da je progib na tom dijelu kalupa najmanji kako ne bi došlo do otvaranja kalupa i stvaranja srha. U nastavku je dan opis nekih karakteristika preša za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa.

Preše MAPLAN mogu ubrizgati volumen u granicama od 1500 do 6000 cm<sup>3</sup>, pri čemu tlak ubrizgavanja može biti u granicama od 100 do 210 bara. Na takve se preše mogu postavljati kalupi najvećih dimenzija od 700x800 mm, pri čemu minimalni otvor preše iznosi oko 200 mm, a maksimalni od 500 do 800 mm.



Slika 9. MAPLAN injekcijska preša <sup>[14]</sup>

Preše REP mogu ubrizgati volumen u granicama od 5000 do 8500 cm<sup>3</sup>, pri čemu tlak ubrizgavanja može biti u granicama od 60 do 250 bara. Na takve se preše mogu postavljati kalupi najvećih dimenzija od 1000x1200 mm, pri čemu minimalni otvor preše iznosi oko 200 mm, a maksimalni od 800 do 1200 mm.



Slika 10. REP injekcijska preša [15]

#### 4.1.1.1. Ubrizgavalica [3]

Plastomeri su bili prvi polimerni materijali koji su se započeli prerađivati injekcijskim prešanjem što je omogućio Eichengunov razvoj postupka injekcijskog prešanja plastomera klipnom ubrizgavalicom. Elastomerni materijali, poput kaučukovih smjesa, počinju se prerađivati tek po razvoju ubrizgavalica s pužnim vijkom prema patentu R. Quielleryja, što je omogućilo brz razvoj injekcijskog prešanja gumenih proizvoda. Ubrizgavalice za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa mogu biti ubrizgavalice za preradu plastomera prilagođene uvjetima prerade kaučukovih smjesa ili čak modularne ubrizgavalice prilagodljive za preradu svih vrsta polimera. Ipak, u praksi se najčešće susreću ubrizgavalice kao posebno konstruirani proizvodi, odnosno pod-sustavi preša za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa.

Ubrizgavalice se sastoje od:

- jedinice za pripremu taljevine i ubrizgavanje,
- temperirala cilindra za taljenje,
- jedinice za zatvaranje kalupa,
- pogonske jedinice,
- jedinice za vođenje
- i sigurnosnih uređaja.

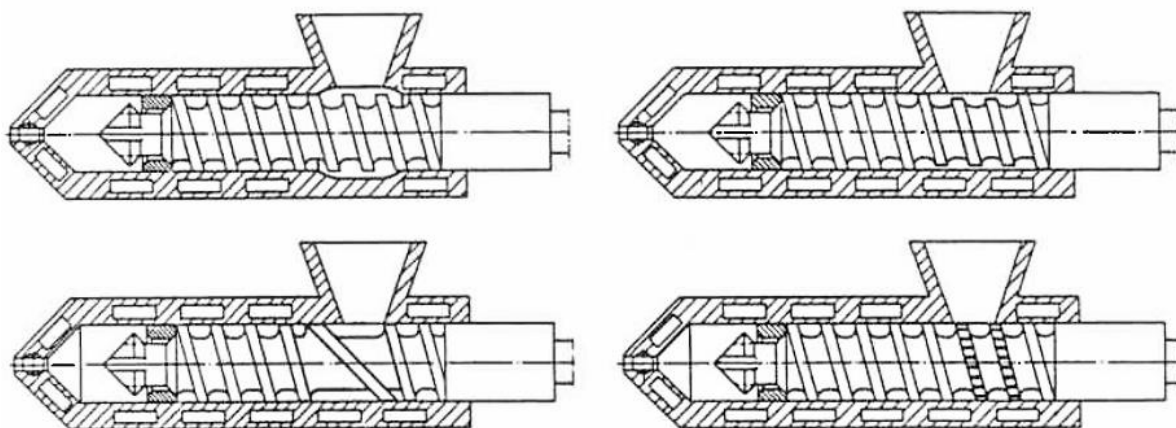
Neki od temeljnih zadataka suvremenih ubrizgavalica za preradu kaučukovih smjesa su:

- temperirati cilindar za taljenje i mlaznicu s pomoću ulja ili vode
- mlaznicu i prednju zonu cilindra treba posebno zagrijavati
- osigurati traženu smičnu viskoznost taljevine
- jedinica za ubrizgavanje mora osigurati pritiske ubrizgavanja do 25 bara
- omogućiti neovisno upravljanje početkom doziranja
- omogućiti neovisno upravljanje odmicanjem mlaznice
- omogućiti podešavanje frekvencije vrtnje pužnog vijka
- uvlačna zona cilindra za taljenje ne smije imati utjecaj na dobavu.

Pužni vijci jedinice za pripremu taljevine i ubrizgavanje mogu se podijeliti u tri osnovne skupine:

- pužni vijci koji samo transportiraju kaučukovu taljevinu,
- pužni vijci koji stlačuju kaučukovu taljevinu
- i degresivno izvedeni pužni vijci koji negativno stlačuju kaučukovu taljevinu.

S obzirom na to da svaka izvedba ima svojih prednosti i nedostataka, pužni vijci se na suvremenim ubrizgavalicama izvode u više zona kako bi se objedinila dobra svojstva navedenih skupina pužnih vijaka, a neke primjere pokazuje **slika 11**.



Slika 11. Primjeri uvlačnih zona ubrizgavalica <sup>[3]</sup>

Tijek uvlačenja kaučukove smjese u uvlačnu zonu ubrizgavalice obilježen je vrlo složenim i međuzavisnim parametrima: veličina granulata, poprečni presjek kaučukove vrpce, parametri taljenja, te geometrija pužnog vijka i uvlačne zone. U cilju održavanja ponovljivosti proizvodnog ciklusa, potrebno je osigurati nesmetano uvlačenje granulata ili vrpce u cilindar za taljenje od strane pužnog vijka koji je zatim transportira prema sabirnici. Kako bi se spriječilo rotiranje kaučukove taljevine zajedno s pužnim vijkom, potrebno je postići različitu hrapavost površine pužnog vijka i cilindra za taljenje, pa je uobičajeno da stijenke cilindra za taljenje budu hrapave, a površina pužnog vijka visoko polirana. Kaučukova smjesa se u praksi najčešće uvlači u obliku trake koju karakteriziraju širina  $b$  i debljina  $d$ . S obzirom na to da je brzina uvlačenja  $v$  proporcionalna frekvenciji vrtnje pužnog vijka, moguće je izračunati teoretski dobavljeni volumen smjese  $q_v$  kao:

$$q_v = b \cdot d \cdot v \quad (4.1.)$$

Iz navedene formulacije moguće je ustanoviti teorijsku ovisnost učinka ubrizgavalice o frekvenciji vrtnje pužnog vijka, no dodatnu pažnju potrebno je posvetiti stvarnoj ovisnosti učinka ubrizgavalice o frekvenciji vrtnje pužnog vijka. Stvarni učinak povećava se degresivno s porastom frekvencije vrtnje pužnog vijka zbog istovremenog povišenja temperature taljevine (dodatno trenje). Ukoliko se dobavi veća količina kaučukove smjese od učinka ubrizgavalice, višak taljevine će se vratiti u uvlačnu zonu cilindra za taljenje te sa tek dobavljenom kaučukovom smjesom tvoriti gnjetinu koja onemogućava dobavu nove smjese. Na učinak ubrizgavalice utječe i veličina uspornog pritiska jer visoka vrijednost naknadnog pritiska može ubrzati stvaranje gnjetine. U praksi je nužno izbjeći stvaranje gnjetine, ali i osigurati dovoljno

doziranje taljevine, pa se radna točka ubrizgavalice nalazi u graničnom području stvaranja gnjetine.

Postupak ubrizgavanja kaučukove taljevine zapravo je vrlo sličan kontinuiranom postupku prerade kaučukovih smjesa – ekstrudiranju, što u praksi omogućava prenošenje zakonitosti koje vrijede pri ekstrudiranju u područje injekcijskog prešanja, uz promijenjene rubne uvjete. No unatoč tom proračunskom modelu, izbor jedinice za pripremu i ubrizgavanje taljevine moguće je provesti pomoću dijagrama, uz praćenje smjernica navedenih u [3].

#### 4.1.1.2. Sustav za temperiranje [3]

Održavanje pravilnog toplinskog režima linije za proizvodnju injekcijski prešanih gumenih otpresaka jest ukupna funkcija sustava za temperiranje. Sustav za temperiranje, pri procesu injekcijskog prešanja mora izvršavati sljedeće zadaće:

- kalupu dovesti toplinu potrebnu za umrežavanje kaučukove smjese
- održati propisano toplinsko stanje kalupa na referentnoj temperaturi.

Temperiranje kalupa se, prema načinu zagrijavanja kalupa, može podijeliti kao:

- zagrijavanje temperiralom (ulje, para)
- zagrijavanje grijalima (elektro-otporno, indukcijsko, poluvodičko).

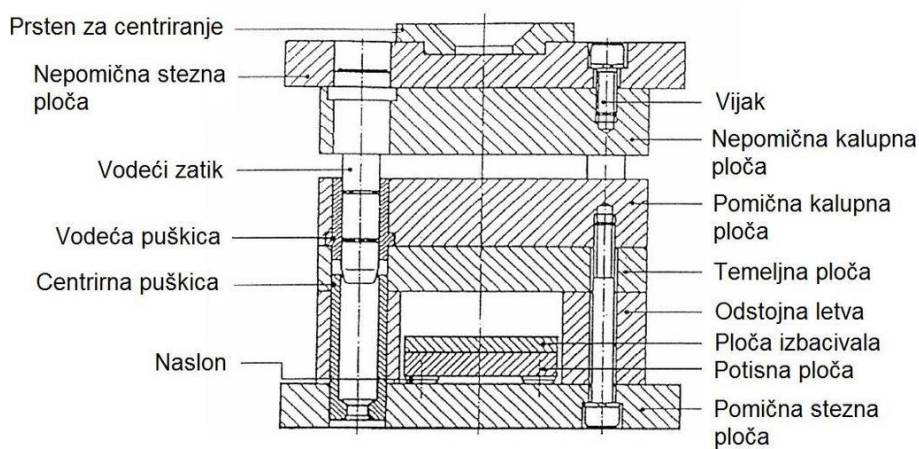
U praksi se najčešće primjenjuje zagrijavanje grijalima, odnosno, kako se zagrijavanje kalupa provodi na preši predviđenoj za injekcijsko prešanje, njene grijaće ploče mogu lako kalupu predati toplinu potrebnu za pravilno odvijanje procesa. Pri tome je potrebno posvetiti pažnju preciznoj regulaciji temperature na svim bitnim dijelovima kalupa tako da regulacijsko odstupanje bude unutar  $\pm 1\%$  od tražene vrijednosti.

U slučajevima kada se proizvodi gumeni proizvod kompleksne geometrije, velikih dimenzija ili posebnih svojstava, u kalupu je moguće izraditi kanale kojima bi se provodilo temperiralo ili u koje bi se postavila grijala za dovođenje dodatne količine topline. Takav sustav za temperiranje bi se smatrao pod-sustavom kalupa za injekcijsko prešanje. Pri izradi otpreska od smjese koja umrežavanjem oslobađa znatnu količinu topline može se pojaviti potreba za odvođenjem topline iz kalupne šupljine. U tom je slučaju potrebno iskoristiti opisanu izvedbu sustava za temperiranje, ali s potpuno drukčijom namjenom; potrebno je rashladnim medijem odvoditi višak toplinske energije iz kalupne šupljine. Kanali kojima se odvodi toplina u praksi se nazivaju hladnim kanalima i potrebno ih je razlikovati od kanala hladnog uljevnog sustava.

#### 4.1.2. Kalup <sup>[3],[4]</sup>

Središnji element sustava za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa naziva se kalup što podrazumijeva proizvod komplicirane i kompleksne strukture te određene namjene. Pri tome se pojam *kompliciran* odnosi na postojanje velikog broja elemenata koji čine kalup, a pojam *kompleksan* na velik broj odnosa i međudjelovanja elemenata kalupa. Kalup se sastoji od komponenata koje treba povezati i sklopiti u predmete uporabe tj. funkcijske sklopove koji se mogu sastavljati, kombinirati i prilagođavati. Oblikovanjem komponenti kalupa nastoji se postići oblikovanje strukture kalupa tako da se postigne što veća funkcijska kompleksnost i što manja strukturna kompleksnost. Kako bi se smanjila strukturna kompleksnost kalupa potrebno je koristiti što manji broj jednostavnih komponenti, čemu se teži postupcima normizacije, unifikacije, tipizacije i prilagodljivosti kalupa. Ukupna funkcija kalupa ostvaruje se izvršavanjem svih parcijalnih funkcija kalupa, prikazanih na funkcijskoj strukturi sustava za injekcijsko prešanje polimera.

Nosivu konstrukciju kalupa čini određen broj kalupnih ploča, a naziva se kućištem kalupa. Dijelovi kućišta kalupa, prikazani na **slici 12.**, su poluproizvodi na kojima se postupcima strojne obrade izrađuju dijelovi poput kalupne šupljine, uljevnih kanala te ostalih elemenata kalpa. Izvedbom kalupa nužno je osigurati jednostavno i sigurno pričvršćenje kalupa na ubrizgavalicu, kao i međusobnu plan-paralelnost kalupnih ploča kako bi se omogućilo povezivanje dijelova kalupa te odgovarajući prihvat i prijenos sila. Najveće sile kojima je opterećen kalup su vanjska sila (sila zatvaranja kojom djeluje preša na koju je postavljen kalup) i unutarnja sila uzrokovana tlakom taljevine u kalupnoj šupljini (sila uzgona).



Slika 12. Kućište kalupa <sup>[9]</sup>

Iako sama izvedba kalupa može varirati ovisno o karakteristikama gumenog proizvoda, kućišta kalupa moguće je sistematizirati prema tipu kućišta kao:

- pravokutna kućišta
- okrugla kućišta
- kućišta s postranim otvaranjem kalupnih ploča
- kućišta sa školjkastim kalupnim pločama
- posebna kućišta.

U praksi se najčešće susreću prva četiri tipa, ali nije rijedak susret s posebnim tipom koji može karakterizirati posebnost same izvedbe kalupa ili posebne karakteristike gumenog otpreska (geometrija/svojstva).

#### 4.1.2.1. Zadaci kalupa <sup>[3],[4]</sup>

Ukupnom funkcijom kalupa za injekcijsko prešanje podrazumijeva se izvršavanje svih potrebnih radnji radi ostvarenja svih parcijalnih funkcija kalupa. Koristeći se funkcijskom strukturom sustava za injekcijsko prešanje polimera definiraju se temeljni zadaci kalupa:

- prihvaćanje taljevine,
- razdjeljivanje taljevine,
- praoblikovanje taljevine,
- održavanje toplinski ravnotežnog stanja pri propisanoj referentnoj temperaturi,
- prevođenje taljevine u čvrsto stanje, željene strukture i željenih svojstava,
- odzračivanje kalupne šupljine,
- vađenje otpresaka iz kalupne šupljine,
- prihvaćanje kalupa na prešu,
- osiguranje cikličkog rada sustava za injekcijsko prešanje.

Osim temeljnih zadataka, kalup mora:

- prihvatiti sile,
- prenijeti gibanja
- i voditi dijelove kalupa.



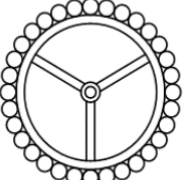
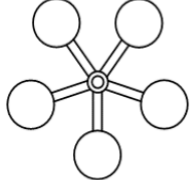



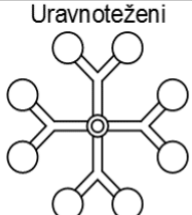
Općenito, od jednostavnog do vrlo kompliciranog kalupa, svi tipovi kalupa moraju izvršiti navedene zadatke kako bi se ispravnim radom svih komponenti ostvarila ukupna funkcija prevođenja tvari ili materijala u gotov proizvod.

#### 4.1.2.2. Kalupna šupljina <sup>[3],[4]</sup>

Kalupna šupljina je prostor koji zatvaraju pomični i nepomični dijelovi kalupa te prostor koji putem uljevnih kanala ispunjava taljevina iz koje procesom prerade nastaje proizvod zahtijevane geometrije i zahtijevanih uporabnih svojstava. Funkcije kalupne šupljine su:

- prihvatanje taljevine,
- prijenos tlaka taljevine,
- definiranje dimenzija i kvalitete površine gumenog otpreska.

Mogući raspored kalupnih šupljina dan je na **slici 13.**, a pri određivanju optimalnog rasporeda i broja kalupnih šupljina nužno je težiti što manjim konačnim dimenzijama kalupa, što manjem putu tečenja taljevine od mlaznice do kalupne šupljine te simetričnom rasporedu kalupnih šupljina radi što pravilnije raspodjele tlaka.

		PREDNOSTI	NEDOSTACI
<b>ZVJEZDASTI RASPORED</b>			
Neuravnoteženi 	Uravnoteženi 	Isti put tečenja do svih kalupnih šupljina. Povoljan raspored za vađenje, naročito kod kalupa s mehaničkim odvrtanjem navojne jezgre.	Ograničen broj kalupnih šupljina. Kod većeg broja kalupnih šupljina veliki je utrošak materijala (ići na redni raspored).
<b>REDNI RASPORED</b>			
Neuravnoteženi 	Uravnoteženi 	Mogući veći broj kalupnih šupljina nego kod zvjezdastog rasporeda. Kod većeg broja kalupnih šupljina razdjelnici su kraći nego kod zvjezdastog rasporeda (manji utrošak materijala).	Nejednolik put tečenja do svih kalupnih šupljina. Istovremeno punjenje kalupnih šupljina je moguće samo uz različite presjeke razdjelnika i/ili ušća (korekcija poprečnog presjeka ušća).
<b>SIMETRIČNI RASPORED</b>			
Neuravnoteženi 	Uravnoteženi 	Isti put tečenja do svih kalupnih šupljina. Nije potrebna korekcija poprečnog presjeka ušća.	Veliki obujam uljavnog sustava, veliki otpad. Preporučuje se primjena vrućeg uljavnog sustava.

Slika 13. Raspored kalupnih šupljina <sup>[4]</sup>

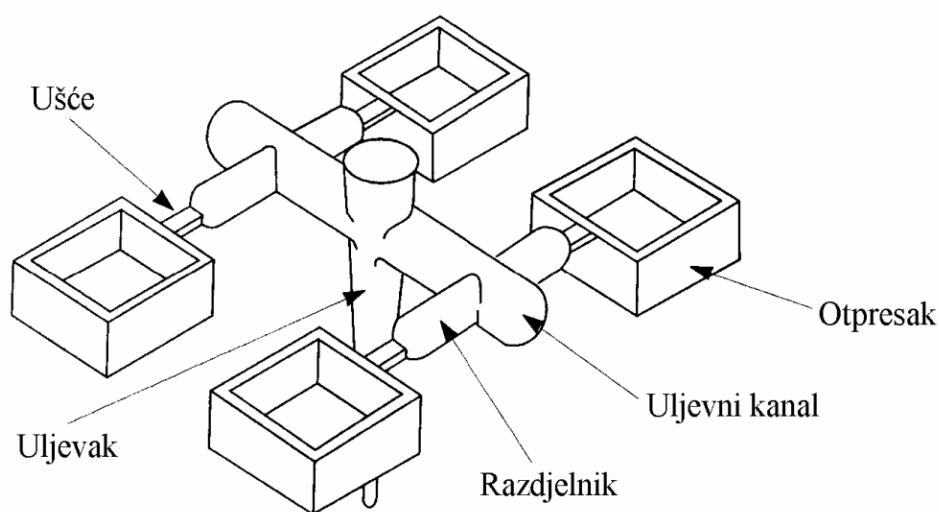
Konstrukcija kalupne šupljine jednog otpreska često je početni korak pri konstrukciji kalupa. Analizom geometrije otpreska potrebno je ustanoviti gdje će se nalaziti razdjelna linija (sljubnica) između kalupnih ploča. U ovom koraku iznimno je važno obratiti pozornost na omogućavanje vađenja otpresaka iz kalupne šupljine po otvaranju kalupa. Često se injekcijskim prešanjem kaučukovih smjesa proizvode rotacijski simetrični proizvodi pa nije rijetka potreba za izradom jezgre kalupne šupljine ili umetaka neke druge namjene. Iako se čini da je kalupna šupljina negativ gotovog proizvoda identičnog oblika i dimenzija, to nije točno. Rezultat naknadnog hlađenja gumenog otpreska po vađenju iz kalupne šupljine je skupljanje otpreska u svim smjerovima. Ovisno o svojstvima korištene kaučukove smjese i uvjetima naknadnog hlađenja otpreska dolazi do sakupljanja gumenog otpreska pa je potrebno uvećati kalupnu šupljinu za postotak skupljanja otpreska. Postotak skupljanja se u praksi iščitava iz *tablice postotaka skupljanja kaučukovih smjesa*, prikazane na **slici 14**. Tablica se generira prikupljanjem podataka od proizvođača kaučukove smjese i/ili provedenim ispitivanjima. Konstrukcija kalupne šupljine završava izradom kanala za pretok viška materijala na kalupnim pločama, jezgri i umetcima. Kanali za pretok viška materijala se kolokvijalno nazivaju "cvik-kanali" jer omogućuju lakše skidanje srha i čišćenje gumenog proizvoda.

Šifra	Vrsta gume	Tvrdoća [ShA]	Obilježje	Dodatne karakteristike	Postotak skupljanja
M	EPDM	60	GUMIIMPEX-6001	-	2.10%
	EPDM	60		SA I PLATNOM (MEMBRANA)	1.50%
	EPDM	70	AA7KWZ		1.70%
	EPDM	70	ŠVICARAC		2.00%
M	EPDM	80	AABBVZ	Ø260/ Ø390x25	1,7%/1,8%
	EPDM	85±5	AA9BAZ	ZA PITKU VODU	1.50%
	EPDM	85±5		ZA PROFILRING	1.40%
	NR	70	GUMIIMPEX-7001	Ø130x14	1.70%
	NR	72	GUMIIMPEX-7201		2.50%
	NBR	40	20725	CRNI	2.20%
	NBR	70	GUMIIMPEX 7002		1.30%
	NBR	80	PPBBFZ		1.60%
	NBR	80	GUMIIMPEX 8001		2.10%
	NBR	80		OBICNI	1.80%
	NBR	90	GUMIIMPEX 9001		1.50%
	H-NBR	60±5			1.70%
	SBR	80		Ø162, 2X23	1.80%
	VITON	70		SMEDI	2.60%
	VITON	80		SMEDI - Ø287/Ø400x6	1,85%/1,75%
	FKM VITON	80		ZA PROFILRING	1.50%
	SILIKON	40		CREVENI	3.00%
	SILIKON	60		TRANSPARENTNI	2.50%
	SILIKON	70		CREVENI	2.50%
	SILIKON	70		TRANSPARENTNI	2.50%
	FVMQ SILI	70		CRNI	3.00%
	FVMQ SILI	-		PLAVI	3.00%
	FMQ SILIK	70			2.50%
	SILIKON	80		TRANSPARENTNI	2.50%
	PU	55		PLAVI	2.50%
	PU	65		NARANČASTI	2.50%
	PUR	86		LJEVANI	1.70%

Slika 14. Tabela postotaka skupljanja smjese

#### 4.1.2.3. Uljevni sustav <sup>[3],[4]</sup>

Osnovna funkcija uljavnog sustava je prihvatiti potrebnu količinu neumrežene kaučukove taljevine od mlaznice ubrizgavalice, razdijeliti je i dovesti do svih kalupnih šupljina, stoga je potrebno izraditi kanale na kalupnim pločama kojima će se kalupnoj šupljini osigurati dobava tvari ili materijala za izradu gumenog proizvoda. Na **slici 15.** prikazan je materijalni izlaz iz kalupa, tj. dijelovi uljavnog sustava koji zajedno s otprescima čine tzv. grozd. Dijelovi uljavnog sustava opisani su u nastavku.

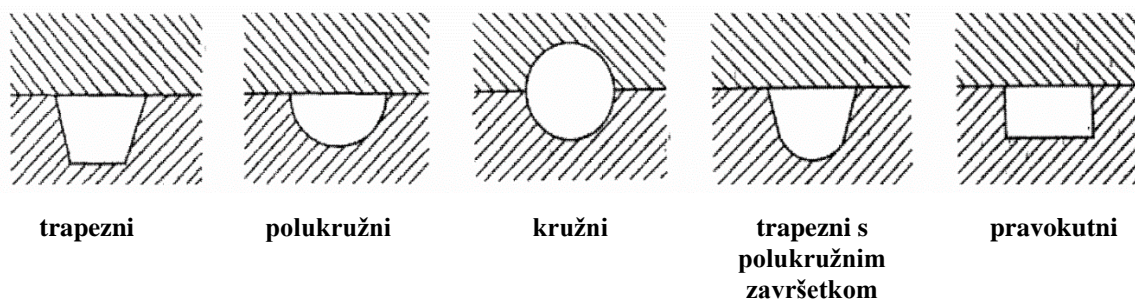


Slika 15. Elementi uljavnog sustava <sup>[4]</sup>

Uljevak je dio uljavnog sustava kojim se omogućava napajanje uljavnih kanala tako da prihvaća kaučukovu taljevinu iz mlaznice ubrizgavalice. U slučaju kada je uljevak jedini element uljavnog sustava, on ispunjava zadatke uljavnih kanala, razdjelnika i ušća. Najčešće se izrađuje na nepomičnoj kalupnoj ploči koja je postavljena na ubrizgavalicu s pomoću prstena za centriranje. Kako bi se osiguralo potpuno i pouzdano vađenje uljevka iz kalupa, često je u obliku krnjeg stošca.

Uljevni kanali povezuju uljevak s razdjelnicima i/ili ušćima, odnosno osiguravaju dobavu potrebne količine taljevine od uljevka do svih kalupnih šupljina. Nužno je ostvariti istovremeno punjenje svih kalupnih šupljina s istim padom tlaka i istom temperaturom taljevine kako bi se omogućila izrada gumenih proizvoda iste kvalitete. Uljevni kanali čine središnji element uljavnog sustava i trebaju biti što kraći i pružati što manji otpor strujanju kaučukove taljevine, odnosno ne smiju imati oštre rubove i nagle promjene presjeka što bi uzrokovalo pad tlaka i

onemogućilo strujanje taljevine. Uobičajeni poprečni presjeci uljernih kanala prikazani su na **slici 16.**, a najpovoljniji od prikazanih je kružni oblik. Kružni oblik u najvećoj mjeri zadovoljava uvjete strujanja, no neki oblici mogu imati prednost jer se izrađuju u samo jednoj kalupnoj ploči pri čemu bi trapezni oblik s polukružnim završetkom pružao najmanji otpor tečenju.





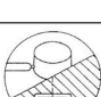
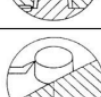
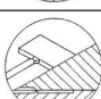
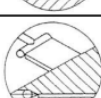
Slika 16. Poprečni presjeci uljernih kanala <sup>[4]</sup>

Oblik i dimenzije uljernih kanala ponajprije ovise o volumenu i tecljivosti određene kaučukove taljevine te veličini ubrizgavalice i vrsti uljevka. Općenito, vrijedi da dimenzije poprečnog presjeka uljernih kanala trebaju biti veće što je viši tlak ubrizgavanja i deblja stjenka gumenog otpreska. Ipak, kako će se dio taljevine umrežiti u uljevnom sustavu i tvoriti gubitak prerađivanog materijala, potrebno je izmjere uljernih kanala održati što je moguće manjima.


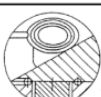
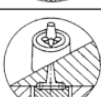
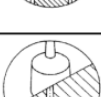
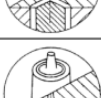
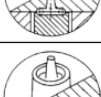
Razdjelnici su kanali koji imaju zadaću povezati uljevne kanale s ušćima kalupnih šupljina, a s obzirom da oblikom i dimenzijama sličje uljevnim kanalima, na njih se postavljaju isti zahtjevi.

Ušća predstavljaju sužene završetke uljernih kanala ili razdjelnika preko kojih taljevina ispunjava kalupnu šupljinu. Određivanje ispravnog oblika i dimenzija te položaja i broja ušća jedan je od najkompleksnijih problema proizvodnje gumenih otpresaka. Osim načina popunjavanja kalupne šupljine taljevinom, ušća utječu na parametre injekcijskog prešanja, konstrukciju kalupa i svojstva gumenog proizvoda. Nerijetko se ušće dimenzionira tako da se zbog mehaničkog rada trenja u kaučukovu taljevinu dovede dodatna količina topline čime se ubrzava umrežavanje i skraćuje proizvodni ciklus. Položaj ušća omogućuje upravljanje smjerom ubrizgavanja kaučukove taljevine u kalupnu šupljinu, čime se stvara jedinstven tok čela taljevine. Kod rotacijsko simetričnih proizvoda idealno je postaviti ušće u središnjici što omogućuje ujednačeno punjenje i smanjuje dodatna naprezanja na jezgri ili umetcima. Vrste poprečnih presjeka ušća mogu se podijeliti u 6 osnovnih skupina koje su prikazane na **slikama 17. i 18.**, uz opis njihovih glavnih karakteristika. Poprečni presjek ušća najčešće se odabire na

temelju oblika uljevnih kanala. Dok neke vrste ušća karakterizira jednostavnost izrade, najbolji rezultati ostvaruju se kružnim ušćima koja najmanjom dodirnom površinom uzrokuju najmanji pad tlaka i temperature. Konačne dimenzije poprečnog presjeka ušća u praksi se određuju na osnovi rezultata kontrole dimenzija i izgleda te kvalitete svojstava probnih serija gumenih otpresaka.

Vrsta ušća	Tip ušća	Shema	Primjedba
<i>Točkasto</i>	Nepostojeće (lažno)		Uljevak preuzima ulogu ušća; omogućen visoki naknadni pritisak.
	Normalno (obično) središnje		Sprječen povratni tok taljevine; ne zahtijeva naknadnu obradbu; najčešća uporaba kod tankostijenih otpresaka; pogodni za stvaranje orijentirane strukture.
	Normalno (obično) rubno		
	Podušće (tunelno)		Omogućeno automatsko otkidanje uljevka i njegovo zadržavanje na izvlačilu.
<i>Lepezasto</i>			Uzrokuje manju orijentiranost strukture nego točkasta ušća; prikladnije je pri povišenim udjelima ojačala u plastomeru.
<i>Filmsko</i>			Primjena pri izradbi otpresaka velike površine; postižu smanjenu orijentiranost strukture.

Slika 17. Vrste ušća (a) <sup>[4]</sup>

Vrsta ušća	Tip ušća	Shema	Primjedba
<i>Čekičasto</i>			Ostvaruje se sniženje tlaka u kalupnoj šupljini; poboljšana optička svojstva otpreska.
<i>Prstenasto</i>	Vanjsko		Za kružne, rotacijski simetrične šuplje otpreske. Kalupna šupljina se počinje puniti tek kada se uljevni prsten ispuni plastomernom taljevinom; pri vadenju otpresaka automatski se otkida uljevni sustav
	Unutrašnje		
<i>Kružno</i>	Ljevčasto		Uporaba pri izradbi otpresaka oblika tuljca, prstena, valjka i sl.; omogućuje jednoliko punjenje kalupne šupljine; postižu se jednolike debljine stijenki.
	Membransko		
	Pločasto		

Slika 18. Vrste ušća (b) <sup>[4]</sup>

Konstruktivske izvedbe uljernih sustava mogu biti vrlo raznolike; tako je u nekima uljevak jedini dio uljernih sustava (npr. kalup s jednom klupnom šupljinom), no pri injekcijskom prešanju kaučukovih smjesa razlikuju se dvije temeljne vrste uljernih sustava:

- **čvrsti uljevni sustav** – pri kojem je materijalni izlaz iz kalupa grozd sastavljen od otpresaka i uljernih sustava koje je potrebno razdvojiti bez oštećenja otpreska
- **hladni uljevni sustav** – pri kojem materijalni izlaz iz kalupa čine otpresci i uljevni sustav, pri čemu je uljevni sustav odvojen ili ga se može lako odvojiti od otpresaka

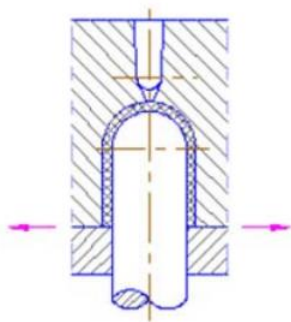
Kako bi se zadovoljio nužni uvjet da kaučukova taljevina potpuno ispuni kalupnu šupljinu, potrebno je konstruirati uljevni sustav tako da pruža što manji otpor tečenju kaučukove taljevine što ujedno dovodi do ispravnog funkcioniranja kalupa i minimalnog trajanja procesa prerade. Pogrešno riješen uljevni sustav može spriječiti popunjavanje kalupne šupljine kaučukovom taljevinom i tako prouzročiti stvaranje oslabljenih mjesta na gumenim proizvodima, stoga su u <sup>[3]</sup> navedene opće smjernice za konstruiranje uljernih sustava:

- točkasta ušća uzrokuju visok pad tlaka, preporučuje se korištenje središnjeg uljevka,
- potrebno je minimizirati duljinu uljernih kanala koliko je to moguće,
- pravokutne otpreske po mogućnosti ubrizgavati duž cijele stranice (filmsko ušće),
- duge otpreske ubrizgavati duž cijele stranice, a ne iz sredine, kako bi se spriječila orijentacija punila,
- šuplje cilindrične otpreske po mogućnosti ubrizgavati preko kružnih središnjih ušća, a izbjegavati postrano ubrizgavanje kako proizvod ne bi bio ekscentričan,
- koliko je moguće, izbjegavati primjenu više od jednog ušća po otpresku kako ne bi došlo do spajanja struja taljevine (oslabljeni spoj),
- pri uporabi više ušća po otpresku, potrebno je da mjesto spajanja struja taljevina bude na najmanje osjetljivom mjestu.

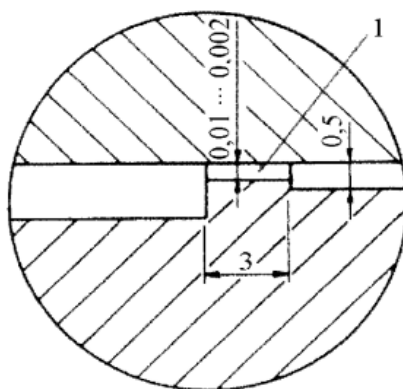
Usvajanje određene konstrukcije kalupa, tj. određivanje oblika, rasporeda i dimenzija uljernih kanala, ukupnog broja kalupnih šupljina te vrste, dimenzija i broja ušća zapravo je konsenzus kojim se nastoji postići što veća proizvodnost gumenih otpresaka visoke i ujednačene kvalitete u što kraćem proizvodnom ciklusu.

#### 4.1.2.4. Sustav za odzračivanje <sup>[3],[4]</sup>

Sustav za odzračivanje omogućuje izlazak zraka iz kalupne šupljine prilikom ubrizgavanja kaučukove taljevine. Važnost odzračivanja kalupne šupljine očituje se činjenicom da zaostali zrak pruža otpor tečenju taljevine prilikom ubrizgavanja i ometa pravilno popunjavanje kalupne šupljine što rezultira sniženom kvalitetom gumenih otpresaka i uključcima zraka. S obzirom na to da se teži što kraćem vremenu ubrizgavanja, potrebno je smanjiti neželjene efekte zraka zaostalog u kalupnoj šupljini. Prema iskustvenim podacima i/ili rezultatima računalne simulacije tečenja taljevine potrebno je ustanoviti mjesto koje će posljednje ispuniti. To mjesto je idealno za izradu kanala za odzračivanje, no u praksi se kanali za odzračivanje najčešće smještaju na kalupnu ploču u visini sljubnice. Prilikom ubrizgavanja taljevine, zrak odlazi u kanale za pretok viška materijala do kojeg se izrađuju kanali za odzračivanje. Ukoliko je potrebno odzračiti kalupnu šupljinu otpreska s rebrima, izbočinama i sl., umjesto kanala za odzračivanje koriste se umetci od sraslog metalnog praha.



Slika 19. Odzračivanje kalupa kroz kanale na sljubnici <sup>[4]</sup>



Slika 20. Primjer kanala za odzračivanje <sup>[4]</sup>



#### 4.1.2.5. Sustav za vođenje i centriranje <sup>[3],[4]</sup>

Osnovna namjena sustava za vođenje i centriranje je osigurati točno nalijeganje jednog dijela kalupa na drugi. Vanjsko centriranje potrebno je radi točnog pozicioniranja kalupa na ubrizgavalicu i izvodi se pomoću prstena za centriranje, odnosno razdjelnog prstena u slučaju kada na steznim pločama kalupa postoji izolacija. Pozicioniranje kalupa na prešu izvodi se pomoću nosača kalupa koji se vijcima postavljaju na nosive ploče preše. Unutrašnje vođenje i centriranje odnosi se na ispravno pozicioniranje i sklapanje dijelova kalupa što se može izvesti pomoću vodećeg zatika i vodeće čahure. Prema potrebi, mogu se koristiti i centralne čahure koje se postavljaju u središnje kalupne ploče. Na vodećim zaticima se mogu izraditi utori za podmazivanje kako bi se omogućilo lakše vođenje dijelova kalupa. Kod velikih i masivnih kalupa, često se upotrebljava konusno vođenje sa ili bez izmjenjivih letvica odnosno prstena. Osim ispravnog pozicioniranja dijelova kalupa sustavom za vođenje i centriranje, potrebno je osigurati i pozicioniranje jezgri i umetaka za što se mogu koristiti razne izvedbe zatika i čahura, vijci pa čak i valjni ležajevi.



Slika 21. Elementi sustava za centriranje <sup>[4]</sup>



## 4.2. Proizvodni proces injekcijski prešanih gumenih proizvoda <sup>[3]</sup>

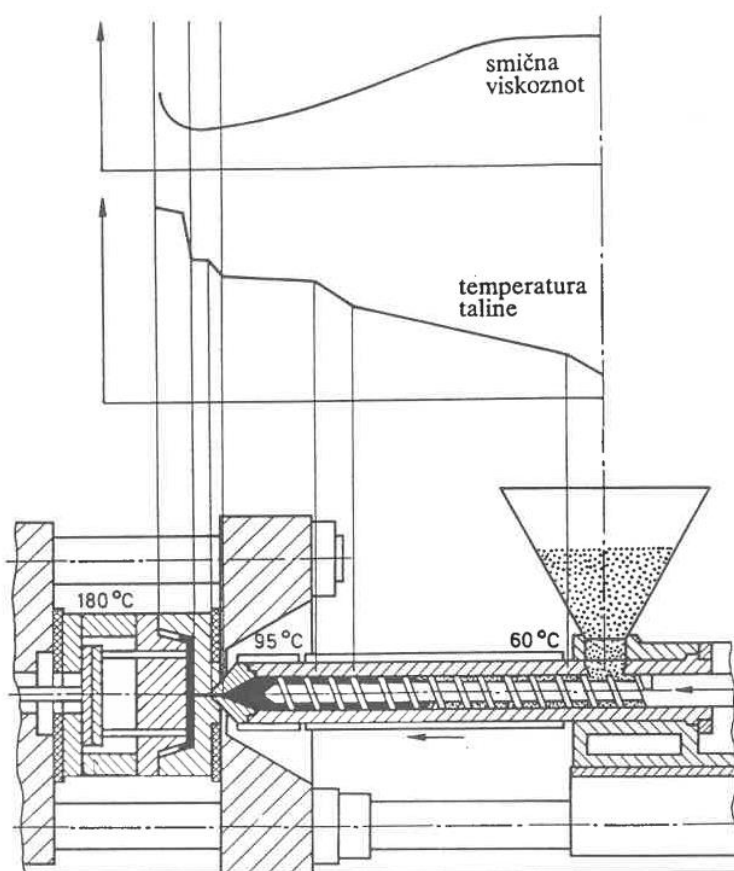
Proizvodni proces injekcijski prešanih gumenih proizvoda karakterizira reakcija umrežavanja. Proizvodnja tvorevina uz umrežavanje uključuje oplemenjivanje tvari u materijal, reakcijsko praoblikovanje (reakcijska prerada) umreživih taljevina, promjenu oblika (obrada) te povezivanje, oplemenjivanje i promjenu svojstava izratka u gotov proizvod. Kaučukova taljevina podrazumijeva kaučukovu smjesu niske viskoznosti, potrebne temperature i dovoljne tecljivosti, kojoj se u dodiru sa vrućim stjenkama uljevnog sustava i kalupne šupljine dodatno snižava viskoznost, čime se širi i ispunjava kalupnu šupljinu putevima najmanjeg otpora. S obzirom na to da će umrežavanjem u kalupu taljevina imati sve veću viskoznost, nužno je poznavanje reoloških i toplinskih svojstava kaučukove taljevine te njihov utjecaj na svojstva gotovog gumenog proizvoda.

Prije početka procesa prerade nužno je pripremiti SIPKS i uspostaviti njegovu toplinsku ravnotežu. Nakon uvjerenja o ispravnom radu svih elemenata SPIKS-a, potrebno je cilindar za taljenje, kalup i temperiralo zagrijati na propisane početne temperature prerade. Iako će se toplinska ravnoteža postići tek nakon nekoliko probnih ciklusa, pri početnom podešavanju parametara prerade potrebno je pridržavati se sljedećih uputa<sup>[3]</sup>:

- temperaturu mlaznice i cilindra za taljenje treba podesiti tako da temperatura cilindra iznosi 60% vrijednosti temperature pri kojoj kaučukova smjesa počinje umrežavati, a temperaturu mlaznice treba imati 70% te vrijednosti
- temperatura stjenke kalupne šupljine mora biti znatno viša od temperature pri kojoj kaučukova smjesa počinje umrežavati (npr. 180°C)
- potrebno je težiti što većoj vrijednosti uspornog pritiska što olakšava punjenje kalupne šupljine, a istim se znatnija količina topline u hidrauličkom cilindru dobiva mehaničkim trenjem
- tijekom ubrizgavanja potrebno je ubrizgavati s maksimalnom učinkovitošću hidrauličkog sustava, time se u svakom ciklusu može postići maksimalna brzina ubrizgavanja
- s porastom broja ciklusa potrebno je povećavati volumen doziranja tako da se tijekom ubrizgavanja ispuni 99% volumena kalupne šupljine.

Proces injekcijskog prešanja gumenih proizvoda započinje dobavom kaučukove smjese koja se uvlači u cilindar za taljenje, gdje se nalazi pužni vijak koji navojima zahvaća kaučukovu smjesu, te ju toplinom mehaničke energije trenja i toplinom dovedenom cilindru dovodi u stanje

potrebne smične viskoznosti. **Slika 22.** pokazuje raspodjelu smične viskoznosti i temperature taljevine uzduž cilindra za taljenje i kalupa. Pri vrtnji pužnog valjka kaučukova se taljevina transportira prema njegovom vrhu što uzrokuje pojavu reakcijske sile koja nastoji pomaknuti pužni vijak unazad. Kako bi se poništilo djelovanje reakcijske sile, potrebno je ostvariti tzv. usporni pritisak u hidrauličkom cilindru ubrizgavalice. Veličina uspornog pritiska znatno utječe na tlak u kalupnoj šupljini i povisuje temperaturu taljevine. Kako bi se usporilo umrežavanje taljevine u cilindru, potrebno je povećati brzinu vrtnje pužnog vijka, što rezultira skraćanjem proizvodnog ciklusa.



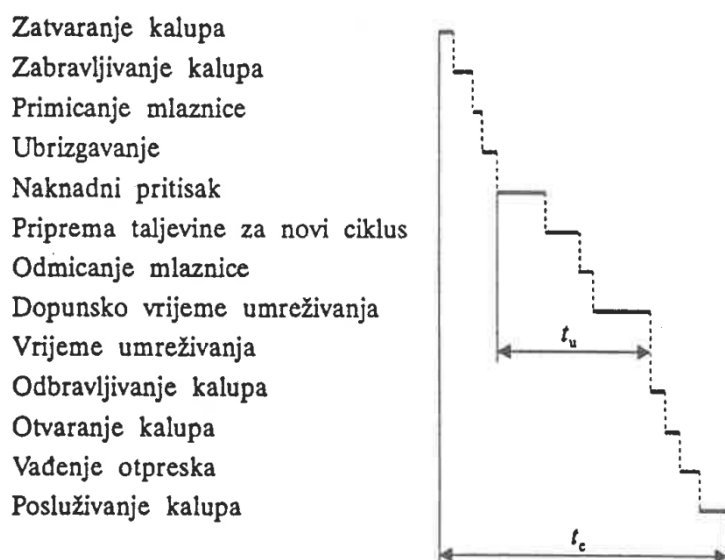
**Slika 22. Raspodjela smične viskoznosti i temperature duž cilindra za taljenje i kalupa** <sup>[3]</sup>

Prije početka ubrizgavanja pripremljene taljevine u zatvoreni kalup, potrebno je primaknuti mlaznicu jedinice za pripremu taljevine i ubrizgavanje tako da nalegne na otvor uljevnog tuljca kalupa. Aksijalnim pomicanjem pužnog vijka prema naprijed, isti djeluje kao klip i tako ubrizgava taljevinu u kalup. Tijekom ubrizgavanja pužnom se vijku treba blokirati vrtnja, a pritisak kojim stap na hidrauličkom cilindru ostvaruje gibanje pužnog vijka naziva se tlak ubrizgavanja. Vrijednost tlaka ubrizgavanja je najveća vrijednost tlaka koja se postiže u proizvodnom ciklusu.

Nakon volumnog popunjavanja kalupne šupljine taljevinom i njenog stlačivanja, dolazi do sniženja tlaka u hidrauličkom cilindru što rezultira padom tlaka u kalupnoj šupljini. Tlak se snižava do najniže vrijednosti što omogućava odzračivanje kalupne šupljine. Djelovanje naknadnog pritiska započinje nakon djelovanja sniženog pritiska što sprečava povratak taljevine iz kalupne šupljine. Isti je potrebno održati dok proces umrežavanja ne uznapreduje, a zatim je po isteku njegova djelovanja moguće započeti novi ciklus uvlačenja kaučukove smjese rotacijom pužnog vijka. Veličinu i trajanje djelovanja naknadnog pritiska je potrebno odrediti eksperimentalno polazeći od nižih prema višim tlakovima, kako ne bi došlo do otvaranja kalupa ili oštećenja sljubnice. Mlaznica jedinice za pripremu taljevine i ubrizgavanje može se odmaknuti od kalupa. Potrebno vrijeme umrežavanja često je dulje od vremena djelovanja naknadnog pritiska, stoga je tijekom dopunskog vremena umrežavanja, jedinica za taljenje i ubrizgavanje zaustavljena i čeka početak sljedećeg ciklusa.

Po završetku umrežavanja, otvara se kalup iz kojeg se vadi grozd koji tvore otpresci i umreženi uljevni sustav. U posljednjem koraku potrebno je očistiti kalup, premazati ga po potrebi, uložiti eventualno postojeće umetke u kalupnu šupljinu i sve drugo što je nužno za početak novog proizvodnog ciklusa.

Postupci koji opisuju tijek injekcijskog prešanja kaučukovih smjesa i njihovo trajanje dani su na **slici 23.**, koja prikazuje ukupno trajanje proizvodnog ciklusa.



Slika 23. Faze ciklusa injekcijskog prešanja kaučukovih smjesa <sup>[3]</sup>

Na kvalitetu injekcijski prešanih gumenih proizvoda utječu mnogi parametri, na primjer:

- usporni pritisak,
- frekvencija vrtnje pužnog vijka,
- temperatura cilindra za taljenje i mlaznice ubrizgavalice,
- brzina ubrizgavanja,
- naknadni pritisak,
- temperatura stijenke kalupne šupljine i
- vrijeme umrežavanja.

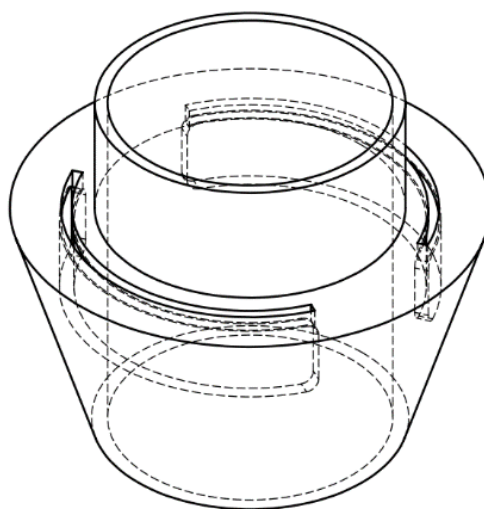
Kada se utjecajni parametri taljenja i ubrizgavanja (izraženi frekvencijom brzine vrtnje pužnog vijka, uspornim pritiskom, temperaturom cilindra za taljenje i mlaznice, te brzinom ubrizgavanja) mogu održati konstantnima (što stanje tehnike danas omogućuje), svojstva otpreska je moguće podešavati već samo mijenjanjem temperature stijenke kalupne šupljine i vremenom umrežavanja.

Danas je cilj potpuno automatsko vođenje rada SPIKS-a i pravljenje proizvoda ujednačene kvalitete sa što manjom količinom škarta. Pri tome se već koriste računalom pokretani programski paketi čija uporaba i dalje ovisi o varijantnosti preradbenih svojstava kaučukove smjese od šarže do šarže. Zbog tih razloga nužno je provoditi pred-pokuse za određivanje naknadnog pritiska, temperature stijenke kalupne šupljine i vremena umrežavanja. Najveća debljina stijenke značajan je podatak koji proizvođaču može sugerirati trajanje umrežavanja kaučukove smjese u gumeni proizvod.

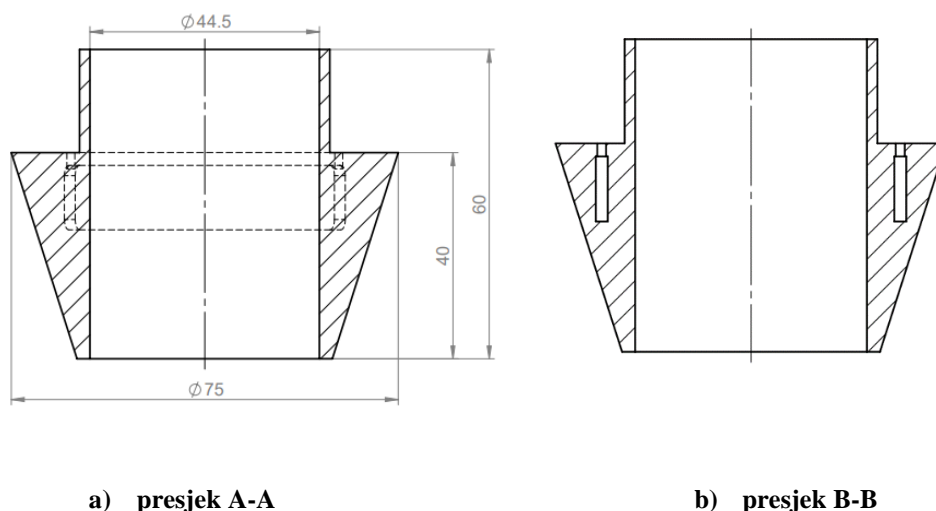
## 5. RAZVOJ KALUPA ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE MANŽETE

U praksi se proizvode gumeni otpresci raznih oblika i dimenzija, čija masa može biti od svega nekoliko grama do više od 100 kg. Proizvođač na temelju zahtijevanih svojstava, oblika i proizvodne količine otpreska odlučuje kojim postupkom prerade kaučukove smjese će izraditi traženi proizvod. Poznato je kako se injekcijskim prešanjem kaučukovih smjesa mogu izraditi gumeni proizvodi visoke kvalitete u velikim proizvodnim količinama. Razvoju kalupa za injekcijsko prešanje prethodi upoznavanje s oblikom, dimenzijama, materijalom (tj. vrsti kaučukove smjese) i ostalim zahtijevanim svojstvima gotovog gumenog proizvoda (npr. tvrdoća).

Za potrebe ovog završnog rada bit će obrađen razvoj kalupa za injekcijsko prešanje manžete koju prikazuje **slika 24.**, a koja će se koristiti kao nastavak crijeva za vodu. Osim postojanosti dimenzija i oblika manžete prikazanih na **slici 25.**, potrebno ju je izraditi od kaučukove smjese na bazi EPDM kaučuka tako da tvrdoća gotovog gumenog proizvoda bude 60 ShA (ShoreA).

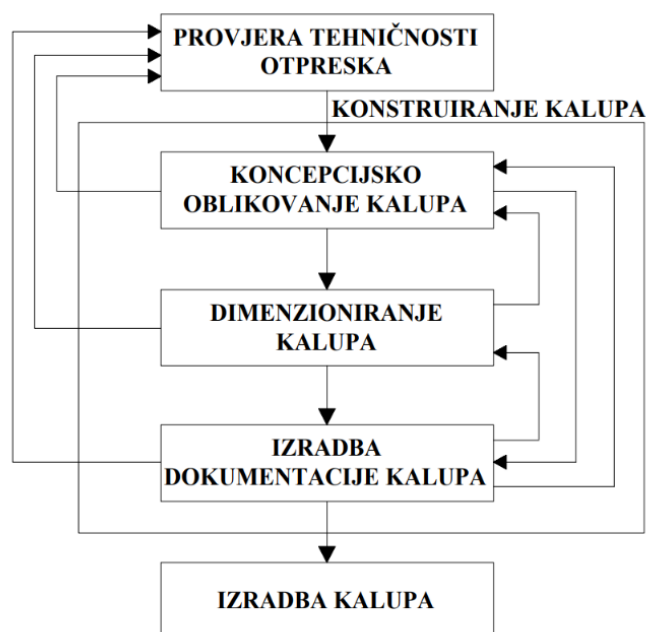


Slika 24. Manžeta (izometrija)



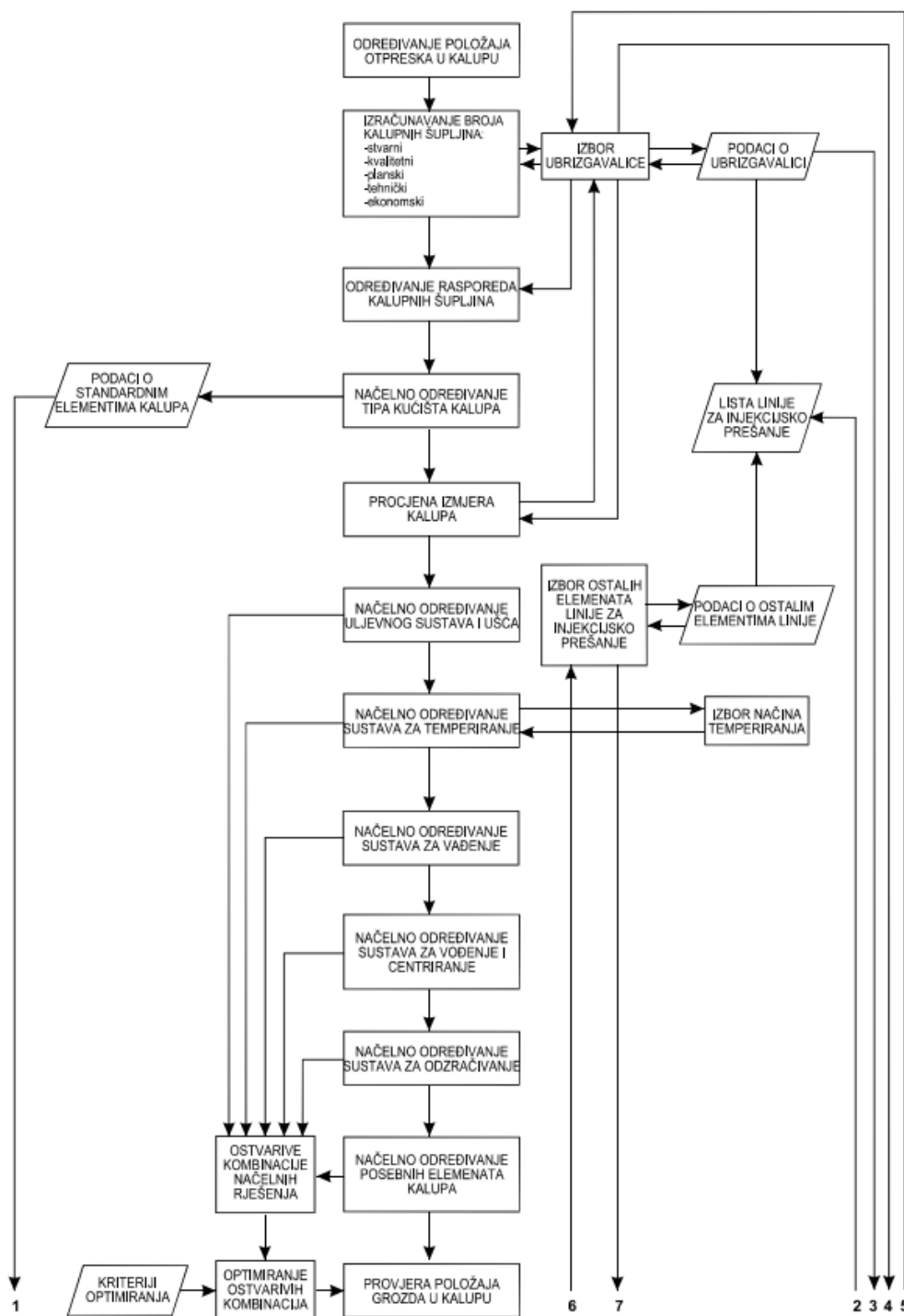
Slika 25. Manžeta

Metodičkim pristupom konstruiranju kalupa za injekcijsko prešanje polimera nastoji se postići optimalna izvedba parcijalnih funkcija kalupa, što rezultira optimalnom ukupnom funkcijom. Slika prikazuje temeljne aktivnosti koje se provode pri konstruiranju kalupa za injekcijsko prešanje. Metodički pristup konstruiranju, iskustvo i intuicija konstruktora ključni su za manji broj optimizacijskih koraka pri razvoju kalupa s dobrim inicijalnim karakteristikama. Za potrebe ovog rada bit će izvedeno konceptijsko oblikovanje kalupa za injekcijsko prešanje manžete prema iskustvenim naputcima proizvođača gumenih proizvoda. Oblikovan kalup će u postupku dimenzioniranja biti podvrgnut reološkom i toplinskom proračunu, dok se u praksi za isti provodi još i mehanički proračun.

Slika 26. Temeljne faze konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje polimera <sup>[4]</sup>

### 5.1. Konceptijsko oblikovanje kalupa za injekcijsko prešanje manžete

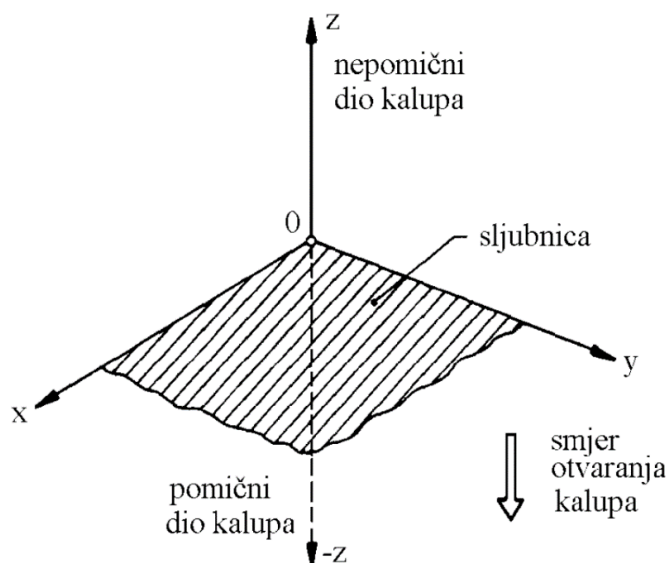
Pri konceptijskom oblikovanju kalupa načelno se određuju svi njegovi elementi koji izravno utječu na pouzdano funkcioniranje kalupa, a provodi se prema **slici 27**. Elementi kalupa će se oblikovati uz pomoć programskog paketa *SOLIDWORKS 2020*.



Slika 27. Faza koncipiranja kalupa za injekcijsko prešanje polimera [4]

### Određivanje položaja otpreska u kalupu

Vodeći se koordinatnim sustavom prikazanim na **slici 28.** potrebno je odrediti gdje će se nalaziti sljubnica, tj. ravnina u kojoj će jedna kalupna ploča nalijegati na drugu. Pri postavljanju kalupa na prešu gornja ploča se postavlja na ubrizgavalicu i biva nepomična tijekom proizvodnog procesa. Položaj sljubnice mora omogućiti vađenje otpreska iz kalupne šupljine. Pri injekcijskom prešanju rotacijsko-simetričnih proizvoda sljubnica kalupa se najčešće nalazi u ravnini najvećeg promjera gumenog otpreska, što je također slučaj pri kalupu za injekcijsko prešanje mažete.

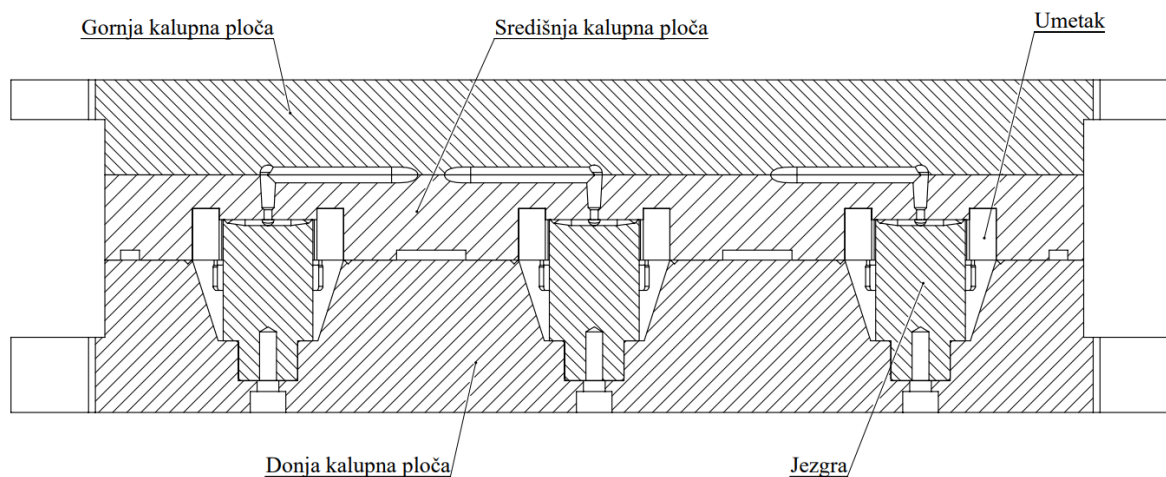


**Slika 28. Određivanje položaja otpreska u kalupu** <sup>[4]</sup>

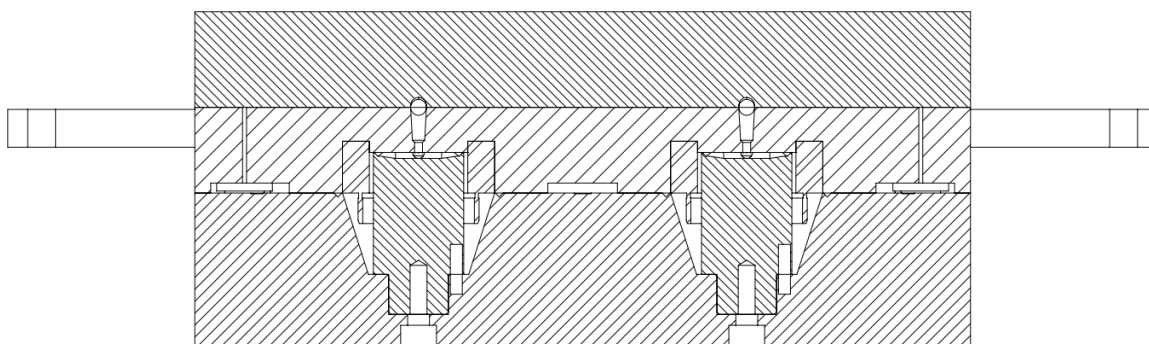
### Načelno oblikovanje kalupne šupljine

Dimenzije kalupne šupljine moraju biti veće od dimenzija otpreska za postotak skupljanja, što u slučaju manžete od EPDM-a iznosi 2%. Sama geometrija gumenog proizvoda dobivena je tako da se u kalupnim pločama izradi oblik određen uvećanim vanjskim dimenzijama otpreska, dok se unutarnji provrt dobiva umetanjem cilindrične jezgre u kalupnu šupljinu. Jezgre za oblikovanje unutarnjeg provrta, kao i umetci koji će u otpresku manžete ostaviti utore traženog oblika i dimenzija, izrađuju se kao zasebni dijelovi. Pri oblikovanju kalupne šupljine potrebno je izraditi kanale za pretok viška taljevine. Prema zahtijevanoj proizvodnoj količini u odnosu na rok isporuke odlučeno je da će se izraditi šest kalupnih šupljina, po tri u dva reda. Prema rasporedu kalupnih šupljina odabran je pravokutan tip kućišta.





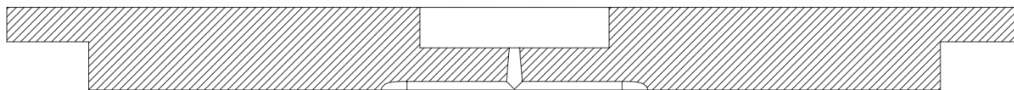
Slika 29. Tri kalupne šupljine u retku



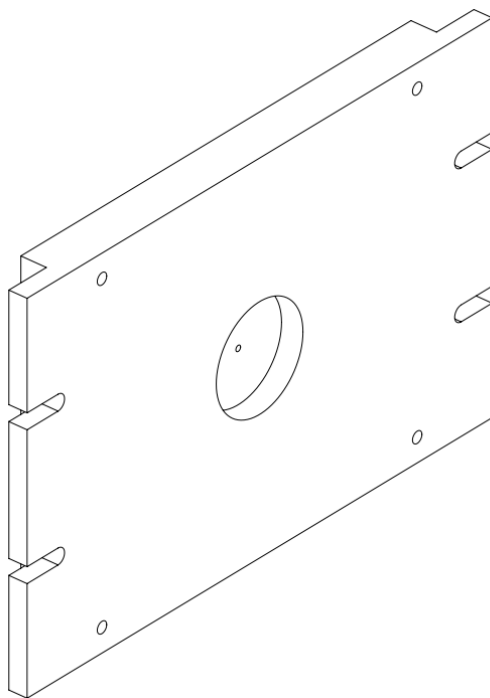
Slika 30. Dva reda kalupnih šupljina

### Načelno oblikovanje uljevnog sustava i ušća

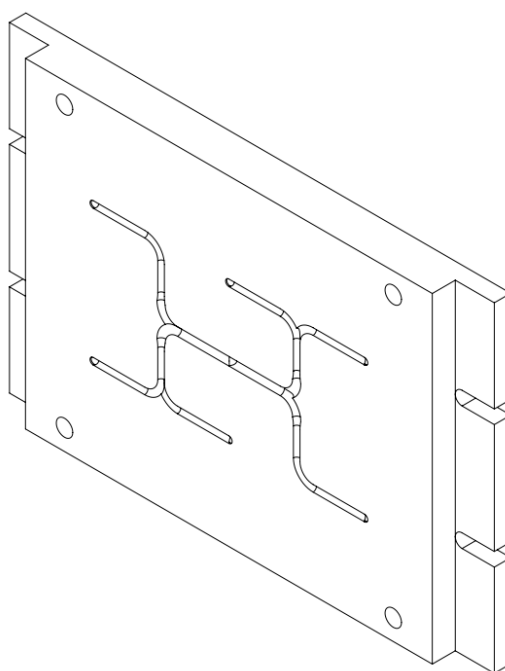
Nakon što je definiran broj i raspored kalupnih šupljina, odlučeno je da će kalup sadržavati tri kalupe ploče, pri čemu će se sljubnica smjestiti između donje i središnje kalupne ploče, a uljevni sustav će se izraditi između središnje i gornje kalupne ploče kako bi se osigurala proizvodnja manžeta bez stvaranja srha. **Slika 31.** prikazuje središnji presjek gornje kalupne ploče na kojoj je izrađen provrt u koji nasjeda prsten za centriranje ubrizgavalice. Nakon tog provrta izrađuje se uljevak u obliku krnjeg stošca u koji će se prihvaćati kaučukova taljevina. Od uljevka prema kalupnim šupljinama izradit će se uljevni kanali i razdjelnici polukružnog oblika.



Slika 31. Uljevak

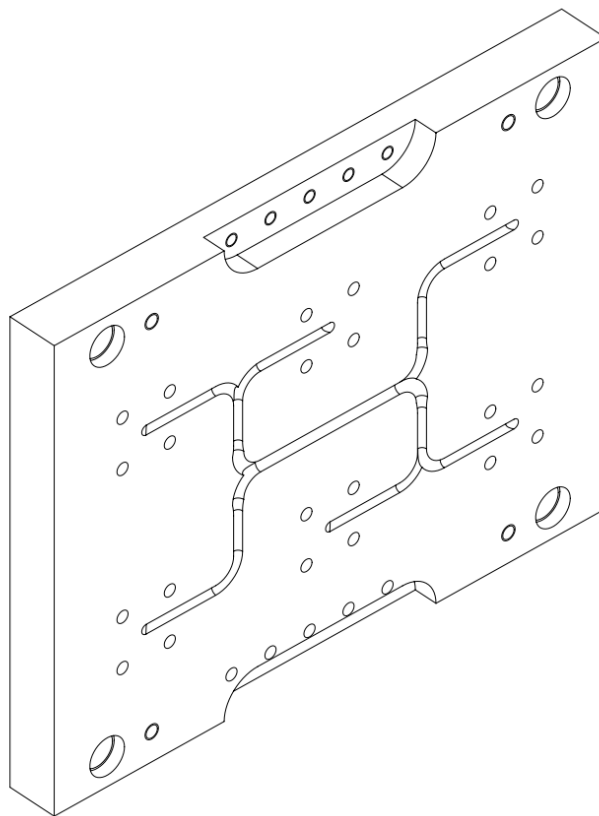


Slika 32. Gornja ploča kalupa

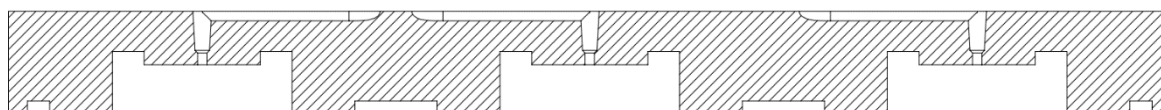


Slika 33. Uljevni kanali na gornjoj ploči kalupa

Na središnjoj kalupnoj ploči također se izrađuju polukružni uljevni kanali kako bi, nakon spajanja kalupnih ploča, poprečni presjek uljevnih kanala bio kružni. Kružni oblik uljevnih kanala pruža najmanji otpor tečenju taljevine, a isti oblik imaju i razdjelnici. Taljevina iz razdjelnika utječe u manje uljevke koji su izrađeni u središnjici manžete.

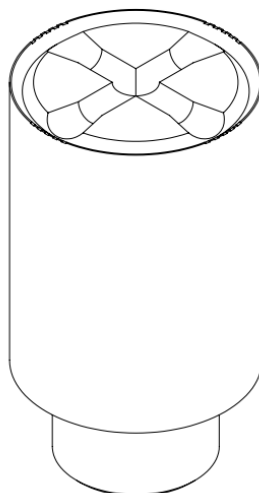


**Slika 34. Uljevni kanali na središnjoj ploči kalupa**



**Slika 35. Uljevci u kalupne šupljine**

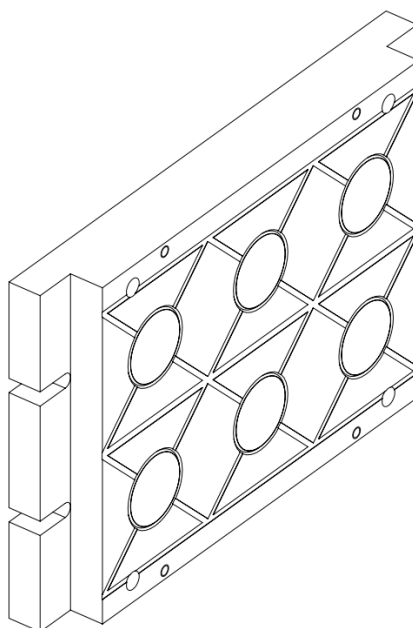
Popunjavanje kalupne šupljine osigurano je izradom lepezastih ušća na jezgri koja se vijcima pričvršćuje u donju kalupnu ploču. Dolazak taljevine iz manjih uljevaka te brzo i ujednačeno popunjavanje kalupne šupljine pridonosi proizvodnji gumenih otpresaka visoko kvalitetnih svojstava, a ujedno ne izaziva koncentrirana naprezanja na jezgri.



**Slika 36.** Ušća na jezgri

#### Načelno oblikovanje sustava za odzračivanje

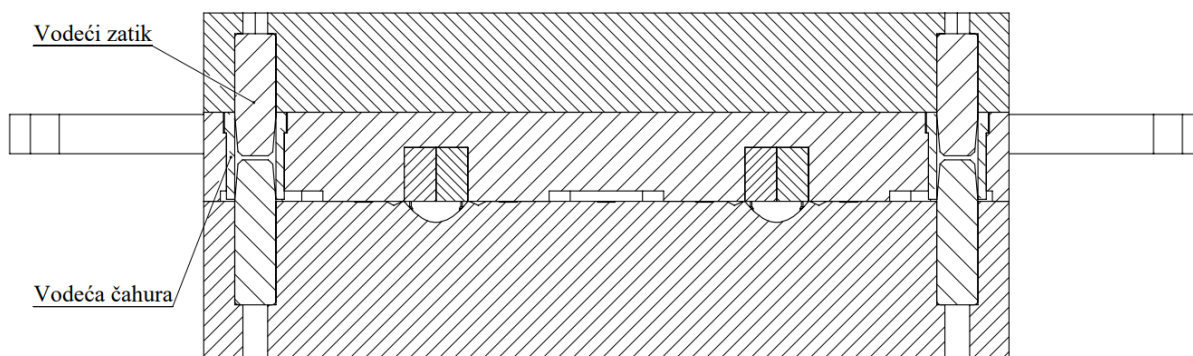
Sustav za odzračivanje će se izraditi u ravnini sljubnice na donjoj kalupnoj ploči. Pri popunjavanju kalupne šupljine kaučukovom taljevinom, zaostali zrak odande odlazi u kanale za pretok viška taljevine do kojih se, od ruba kalupne ploče, izrađuju kanali pravokutnog poprečnog presjeka kroz koje je omogućeno odzračivanje kalupnih šupljina. **Slika 37.** prikazuje donju kalupnu ploču na kojoj se izrađuje sustav za odzračivanje.



**Slika 37.** Sustav za odzračivanje na donjoj kalupnoj ploči

### Načelno oblikovanje sustava za vođenje i centriranje

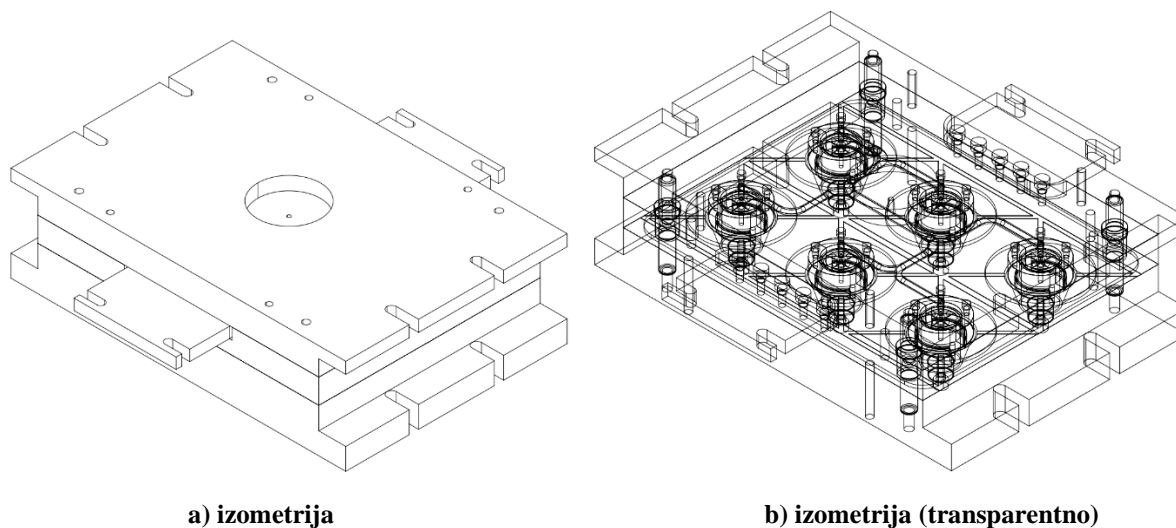
Iako su elementi sustava za vođenje i centriranje najčešće standardni elementi, moguć je slučaj da se ti elementi izrađuju posebno u alatnici. Na taj način bi se izradila vodeća čahura i vodeći zatik. Steznim se spojem u gornju i donju kalupnu ploču postavljaju po četiri vodeća zatika, a u središnju kalupnu ploču po četiri vodeće čahure. Ukoliko se osigura labavi dosjed između čahure i zatika, nije potrebno podmazivanje sustava za vođenje prikazanog na **slici 38**.



**Slika 38. Sustav za vođenje i centriranje**

### Načelno određivanje gabaritnih dimenzija kalupa

Gabaritne dimenzije kalupa moguće je približno odrediti nakon integracije svih elemenata kalupa na pripadajuća mjesta u kalupnim pločama. Načelno oblikovan kalup za injekcijsko prešanje manžete prikazuje **slika 39.**, a njegove dimenzije dane su u **tablici 2**.



**a) izometrija**

**b) izometrija (transparentno)**

**Slika 39. Kalup za injekcijsko prešanje manžete**

Napomene:

- Pri razvoju kalupa za injekcijsko prešanje manžete nije predviđena integracija sustava za temperiranje jer će se kalup temperirati grijaćim pločama preše.
- Vanjsko vođenje kalupa i njegovo prihvaćanje na prešu omogućeno je izradom utora za prihvrat donje i gornje kalupne ploče na prešu, dok se bočnim podizačima na prešu postavlja središnja kalupna ploča.
- Sustav za izbacivanje otpresaka nije razrađen, no vađenje otpreska iz kalupa nakon otvaranja je olakšano jer otpresci ostaju na umetcima za oblikovanje utora koji su ugrađeni u središnju kalupnu ploču.

U nastavku su dana **tablica 2.** i **3.** koje sadrže dimenzije manžete i kalupa te njihova toplinska i reološka svojstva potrebna za središnju fazu konstruiranja kalupa. Dimenzioniranje kalupa za injekcijsko prešanje manžete obuhvaća provedbu toplinskog i reološkog proračuna koji slijede.

**Tablica 2. Proračunske dimenzije manžete i svojstva odabrane kaučukove smjese**

Manžeta, EPDM 6001 c			
Svojstvo	Oznaka	Mjerna jedinica	Vrijednost
Gustoća <sup>[5]</sup>	$\rho_T$	kg/m <sup>3</sup>	1070
Temperatura taljevine	$T_T$	K	363,15
Temperatura postojanosti oblika	$T_{PO}$	K	423,15
Temperatura staklišta <sup>[5]</sup>	$T_g$	K	218,15
Specifični toplinski kapacitet <sup>[5]</sup>	$c_{pT}$	kJ/kgK	2,06
Toplinska provodnost <sup>[5]</sup>	$\lambda_T$	W/mK	0,2
Dinamička viskoznost	$\eta_T$	Pas	740
Postotak skupljanja	$S_L$	%	2
Dimenzija	Oznaka	Mjerna jedinica	Vrijednost
Vanjski promjer	$d_v$	mm	75
Unutarnji promjer	$d_u$	mm	44,5
Ukupna visina	$h_{uk}$	mm	60
Visina konusnog dijela	$h_k$	mm	40
Debljina stjenke	$s_0$	mm	15,25
Volumen	$V_M$	mm <sup>3</sup>	66580

Tablica 3. Proračunske dimenzije kalupa i svojstva odabranog čelika

Kalup, čelik Č 0562			
Svojstvo	Oznaka	Mjerna jedinica	Vrijednost
Temperatura stjenke kalupne šupljine	$T_K$	K	468,15
Gustoća <sup>[6]</sup>	$\rho_K$	kg/m <sup>3</sup>	7850
Specifični toplinski kapacitet <sup>[6]</sup>	$c_{pK}$	kJ/kgK	0,46
Toplinska provodnost <sup>[6]</sup>	$\lambda_K$	W/mK	50
Broj kalupnih šupljina	$n_{K\check{S}}$	1	6
Dimenzija	Oznaka	Mjerna jedinica	Vrijednost
Duljina kalupa	$d_K$	mm	400
Širina kalupa	$\check{s}_K$	mm	300
Visina kalupa	$h_K$	mm	168

U **tablici 4.** dane su proračunski bitne karakteristike preše, proizvođača MAPLAN, predviđene za injekcijsko prešanje manžete.

Tablica 4. Karakteristike injekcijske preše

Injekcijska preša MAPLAN, MTF 2000/250 edition S (god. proizvodnje: 2017.)			
Karakteristika	Oznaka	Mjerna jedinica	Vrijednost
Minimalna brzina ubrizgavanja	$v_{uMIN}$	mm/s	0,5
Maksimalna brzina ubrizgavanja	$v_{uMAX}$	mm/s	16
Minimalni tlak ubrizgavanja	$p_{uMIN}$	N/mm <sup>2</sup>	10
Maksimalni tlak ubrizgavanja	$p_{uMAX}$	N/mm <sup>2</sup>	21
Maksimalni volumen ubrizgavanja	$V_{uMAX}$	cm <sup>3</sup>	2000
Maksimalna sila držanja kalupa	$F_{dMAX}$	kN	2500
Minimalna visina kalupa	$h_{MIN}$	mm	130
Maksimalna visina kalupa	$h_{MAX}$	mm	400

## 5.2. Proračun kalupa za injekcijsko prešanje manžete

### 5.2.1. Reološki proračun kalupa <sup>[4]</sup>

#### Tlak ubrizgavanja

Kako bi se osiguralo potpuno ispunjavanje kalupne šupljine i onemogućio izlazak ubrizgane taljevine, potrebno je odrediti veličinu tlaka ubrizgavanja. Tlak ubrizgavanja mora osigurati potrebnu vrijednost tlaka u kalupnoj šupljini koji je uvjetovan preradbenim svojstvima smjese i nadomjestiti pad tlaka u uljevnom sustavu, a može se izračunati kao:

$$p_u \geq \Delta p_{us} + p_k \quad (5.1.)$$

gdje je:

- tlak ubrizgavanja -  $p_u$
- tlak u kalupnoj šupljini -  $p_k = 15 \text{ N/mm}^2$
- pad tlaka u uljevnom sustavu -  $\Delta p_{us} = \Delta p_{uljt} + \Delta p_{uljk}$
- pad tlaka u uljevnim kanalima -  $\Delta p_{uljk}$
- pad tlaka u uljevnim tuljcima -  $\Delta p_{uljt}$

Pad tlaka u određenom segmentu uljavnog sustava može se izračunati prema relaciji koja se naziva *Hagen-Poiseullova* jednadžba i glasi:

$$\Delta p = \frac{128 \cdot \eta_T \cdot l_s \cdot q_v}{\pi \cdot d_s^4} \quad (5.2.)$$

gdje je:

- dinamička viskoznost taljevine -  $\eta_T = 740 \text{ Pas}$
- duljina segmenta uljavnog sustava -  $l_s$
- promjer segmenta uljavnog sustava -  $d_s$
- volumni protok taljevine -  $q_v = \frac{Vg}{t_u}$
- vrijeme ubrizgavanja -  $t_u = 36 \text{ s}$
- volumen grozda -  $Vg = n_{K\check{s}} \cdot V_M + V_{US}$
- volumen uljavnog sustava -  $V_{US} = V_{UK} + V_{UT1} + V_{UT2}$
- volumen uljevnih kanala -  $V_{UK} = \frac{d_{uljk}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{uljk}$
- promjer uljevnih kanala -  $d_{uljk} = 12 \text{ mm}$
- duljina uljevnih kanala -  $l_{uljk} = 135 \text{ mm}$
- volumen uljavnog tuljaca za ubrizgavanje -  $V_{UT1} = \frac{d_{uljt1}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{uljt1}$



- promjer uljavnog tuljca za ubrizgavanje -  $d_{uljt1} = 12,5$  mm
- duljina uljavnog tuljca za ubrizgavanje -  $l_{uljt1} = 24,5$  mm
- volumen uljavnih tuljaca u kalupne šupljine -  $V_{UT2} = \frac{d_{uljt2}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{uljt2}$
- promjer uljavnih tuljaca u kalupne šupljine -  $d_{uljt2} = 7,5$  mm
- duljina uljavnih tuljaca u kalupne šupljine -  $l_{uljt2} = 22,6$  mm

$$V_{UK} = \frac{d_{uljk}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{uljk} = \frac{12^2 \cdot \pi}{4} \cdot 135 = 15268,14 \text{ mm}^3 \quad (5.3.)$$

$$V_{UT1} = \frac{d_{uljt1}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{uljt1} = \frac{12,5^2 \cdot \pi}{4} \cdot 24,5 = 3006,6 \text{ mm}^3 \quad (5.4.)$$

$$V_{UT2} = n_{K\check{S}} \cdot \frac{d_{uljt2}^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_{uljt2} = 6 \cdot \frac{7,5^2 \cdot \pi}{4} \cdot 22,6 = 5990,62 \text{ mm}^3 \quad (5.5.)$$

$$V_{US} = 15268,14 + 3006,6 + 5990,62 = 24265,36 \text{ mm}^3 \quad (5.6.)$$

$$Vg = 6 \cdot 66580 + 24265,36 = 423745,36 \text{ mm}^3 \quad (5.7.)$$

$$q_v = \frac{423745,36}{36} = 11770,7 \text{ mm}^3/\text{s} \quad (5.8.)$$

Pad tlaka u uljavnim tuljcima čini suma pada tlaka u uljevnom tuljcu koji prihvaća taljevinu iz mlaznice ubrizgavalice i pad tlaka u uljevcima u kalupne šupljine.

$$\Delta p_{uljt} = \frac{128 \cdot \eta_T \cdot l_{uljt1} \cdot q_v}{\pi \cdot d_{uljt1}^4} + \frac{128 \cdot \eta_T \cdot l_{uljt2} \cdot q_v}{\pi \cdot d_{uljt2}^4} \quad (5.9.)$$

$$\Delta p_{uljt} = \frac{128 \cdot 740 \cdot 10^{-6} \cdot 24,5 \cdot 11770,7}{\pi \cdot 12,5^4} + \frac{128 \cdot 740 \cdot 10^{-6} \cdot 22,6 \cdot 11770,7}{\pi \cdot 7,5^4} \quad (5.10.)$$

$$\Delta p_{uljt} = 0,356 + 2,535 = 2,891 \text{ N/mm}^2 \quad (5.11.)$$

Do pada tlaka u uljavnim kanalima dolazi zbog otpora koji kaučukova taljevina pruža prema tečenju, a izračunava se kao:

$$\Delta p_{uljk} = \frac{128 \cdot \eta_T \cdot l_{uljk} \cdot q_v}{\pi \cdot d_{uljk}^4} = \frac{128 \cdot 740 \cdot 10^{-6} \cdot 135 \cdot 11770,7}{\pi \cdot 12^4} = 2,311 \text{ N/mm}^2 \quad (5.12.)$$

Pad tlaka u uljevnom sustavu čine pad tlaka u uljavnim tuljcima i pad tlaka u uljavnim kanalima.

$$\Delta p_{us} = 2,891 + 2,311 = 5,202 \text{ N/mm}^2 \quad (5.13.)$$

Iz svega dosad navedenog može se proračunati potrebni tlak ubrizgavanja koji iznosi:

$$p_u \geq 5,202 + 15 = 20,202 \text{ N/mm}^2 \quad (5.14.)$$

Proračun sile držanja kalupa

Potrebno je izračunati silu kojom jedinica za zatvaranje mora držati kalup zatvorenim kako bi postupak prerade bio valjan, a isto se provodi prema formuli:

$$F_d = p_k \cdot (S_M + S_{uk}) \cdot k \quad (5.15.)$$

gdje je:

- površina manžete projicirana na ravninu sljubnice -  $S_M = n_{K\dot{s}} \cdot \frac{(d_v^2 - d_u^2) \cdot \pi}{4}$
- površina uljernih kanala projicirana na ravninu sljubnice -  $S_{uk} = 4 \cdot l_{uljk} \cdot d_{uljk}$
- faktor sigurnosti -  $k = 1,2$

$$S_M = 6 \cdot \frac{(75^2 - 44,5^2) \cdot \pi}{4} = 17175,48 \text{ mm}^2 \quad (5.16.)$$

$$S_{uk} = 4 \cdot 135 \cdot 12 = 6480 \text{ mm}^2 \quad (5.17.)$$

$$F_d = 15 \cdot (17175,48 + 6480) \cdot 1,2 = 425798,64 \text{ N} = 425,799 \text{ kN} \quad (5.18.)$$

**5.2.2. Toplinski proračun kalupa** <sup>[4]</sup>Vrijeme umrežavanja manžete

Vrijeme umrežavanja manžete izračunava se prema:

$$t_{umr} = \frac{s_0^2}{K_o \cdot \alpha_{ef} \cdot \pi^2} \cdot \ln \left[ K_u \cdot \frac{T_T - T_K}{T_{PO} - T_K} \right] \quad (5.19.)$$

gdje su:

- efektivna toplinska difuznost kaučukove taljevine -  $\alpha_{ef} = \frac{\lambda_T}{\rho_T \cdot c_{pT}}$
- koeficijent oblika manžete -  $K_o = 1 + a_{10} + a_{20}$
- koeficijent unutrašnjosti manžete -  $K_u$
- koeficijenti otpreska -  $a_{10}, a_{20}$

Tablica 5. Koeficijenti otpresaka <sup>[4]</sup>

Oblik otpreska			$\hat{t}_h$	$\bar{t}_h$
	$a_{10}$	$a_{20}$	$K_{u1}$	$K_{u2}$
Ploča $b_o = s_o$	0	0	$4/\pi$	$8/\pi^2$
Cilindar $d_o = s_o$ $l_o = \infty$	0	1,15921	1,599	0,975
Cilindar $d_o = s_o$ $l_o$	1,15956	$d_o / l_o$	$6,396/\pi$	$7,802/\pi^2$
Kugla $d_o = s_o$	1	$\sqrt{2}$	2	1,178
Kvadar $s_o, h_o, l_o$ $l_o$ i $h_o > b_o$	$s_o / h_o$	$s_o / l_o$	$64/\pi^3$	$512/\pi^6$
Kvadar $b_o, h_o$ $l = \infty$	$s_o / h_o$	0	$16/\pi^2$	$64/\pi^4$
Kocka $s_o$	1	1	$64/\pi^3$	$512/\pi^6$
Šuplji cilindar (bez unutrašnjeg hlađenja) $d_v - d_u = s_o$	0	0	$4/\pi$	$8/\pi^2$
Šuplji cilindar (obostrano hlađen) $(d_v - d_u) / 2 = s_o$	0	0	$4/\pi$	$8/\pi^2$

Uz iščitavanje koeficijenata otpresaka i svojstava taljevine za izradu manžete može se izračunati da je:

$$\alpha_{ef} = \frac{0,2}{1070 \cdot 2060} = 9,074 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \quad (5.20.)$$

$$K_o = 1 + 0 + 0 = 1 \quad (5.21.)$$

$$K_u = \frac{4}{\pi} \quad (5.22.)$$

$$t_{umr} = \frac{(15,25 \cdot 10^{-3})^2}{1 \cdot 9,074 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2} \cdot \ln \left[ \frac{4}{\pi} \cdot \frac{363,15 - 468,15}{423,15 - 468,15} \right] = 282,76 \text{ s} \quad (5.23.)$$

Vrijeme proizvodnog ciklusa

Vrijeme proizvodnog ciklusa čini vrijeme potrebno za umrežavanje kaučukove smjese i pomoćno vrijeme. Pomoćno vrijeme čini vrijeme potrebno za otvaranje i zatvaranje kalupa, vađenje otpresaka i posluživanje kalupa za početak novog proizvodnog ciklusa, a procijenjeno pomoćno vrijeme za izradu manžete iznosi 60 sekundi.

$$t_c = t_{umr} + t_p \quad (5.24.)$$

$$t_c = 282,76 + 60 = 342,76 \text{ s} \quad (5.25.)$$

Početna temperatura ciklusa

Početna temperatura označava temperaturu kalupne šupljine s kojom kalup ulazi u novi proizvodni ciklus nakon što se otvori i iz njega se izvade otpresci.

$$T_P = \frac{T_K \cdot (b_K + b_T) - (1 - A) \cdot T_T \cdot b_T}{b_K + b_T \cdot A} \quad (5.26.)$$

gdje je:

- toplinska prodornost kalupa -  $b_K = \sqrt{\rho_K \cdot \lambda_K \cdot c_{pK}}$
- toplinska prodornost taljevine -  $b_T = \sqrt{\rho_T \cdot \lambda_T \cdot c_{pT}}$
- bezdimenzijska značajka -  $A = \frac{t_{umr}}{2 \cdot t_c}$

$$b_K = \sqrt{7850 \cdot 50 \cdot 460} = 13436,89 \text{ Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K} \quad (5.27.)$$

$$b_T = \sqrt{1070 \cdot 0,2 \cdot 2060} = 663,96 \text{ Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K} \quad (5.28.)$$

$$A = \frac{282,76}{2 \cdot 342,76} = 0,4125 \quad (5.29.)$$

$$T_P = \frac{468,15 \cdot (13436,89 + 663,96) - (1 - 0,4125) \cdot 363,15 \cdot 663,96}{13436,89 + 663,96 \cdot 0,4125} = 471,14 \text{ K} \quad (5.30.)$$

Dodirna temperatura taljevine i stjenke kalupne šupljine

Pri ubrizgavanju taljevine u kalup uspostavlja se dodirna temperatura na stijenci kalupne šupljine koja se može proračunati prema danom izrazu.

$$T_D = \frac{T_K \cdot b_K + T_T \cdot b_T}{b_K + b_T} = \frac{468,15 \cdot 13436,89 + 363,15 \cdot 663,96}{13436,89 + 663,96} = 463,22 \text{ K} \quad (5.31.)$$

Temperatura otvaranja kalupa

Temperatura otvaranja kalupa predstavlja temperaturnu vrijednost na kojoj se kalup može početi otvarati, a računa se kako slijedi.

$$T_{OK} = 2 \cdot T_K - T_D = 2 \cdot 468,15 - 463,22 = 473,08 \text{ K} \quad (5.32.)$$

Toplinska bilanca kalupa

Iz termodinamičkog gledišta moguće je promatrati kalup za injekcijsko prešanje kao izmjenjivač topline. Analitički se može ustvrditi da kalup u proizvodnom ciklusu izmjenjuje toplinu s okolinom u kojoj se nalazi, s kaučukovom taljevinom i sustavom za temperiranje. Stacionarnost procesa nalaže da je suma toplinskih tokova koje kalup izmjeni jednaka nuli.

$$\phi_O + \phi_T + \phi_{ST} = 0 \quad (5.33.)$$

gdje je:

- toplinski tok izmijenjen s okolinom -  $\phi_O$
- toplinski tok izmijenjen s taljevinom -  $\phi_T$
- toplinski tok izmijenjen sa sustavom za temperiranje -  $\phi_{ST}$

Toplinski tok izmijenjen s taljevinom izračunava se:

$$\phi_T = m_g \cdot c_{pT} \cdot \frac{(T_T - T_{PO})}{t_c} \quad (5.34.)$$

pri čemu je:

- masa grozda -  $m_g = V_g \cdot \rho_T$

$$m_g = 423745,36 \cdot 10^{-9} \cdot 1070 = 0,4534 \text{ kg} \quad (5.35.)$$

$$\phi_T = 0,4534 \cdot 2060 \cdot \frac{(363,15 - 423,15)}{342,76} = -163,5 \text{ W} \quad (5.36.)$$

Toplinski tok izmijenjen s okolinom se izračunava kao:

$$\phi_O = \phi_{zr} + \phi_k + \phi_{ost} \quad (5.37.)$$

gdje je:

- toplinski tok odveden zračenjem stijenki kalupa -  $\phi_{zr}$
- toplinski tok odveden konvekcijom na mirujuć zrak -  $\phi_k$
- ostali gubitci toplinskih tokova -  $\phi_{ost} = 0,1 \cdot (\phi_{zr} + \phi_k + \phi_T)$

Toplinski tok odveden zračenjem izračunati će se kao zbroj toplinskih tokova odvedenih zračenjem pri zatvorenom i otvorenom kalupu.

$$\phi_{zr} = \phi_{zrO} + \phi_{zrZ} = \varepsilon_K \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T_{VK}^4) \cdot (A_O \cdot \frac{t_p}{t_c} + A_Z \cdot \frac{t_{umr}}{t_c}) \quad (5.38.)$$

gdje je:

- korigirani emisijski faktor stijenke kalupa <sup>[7]</sup> -  $\varepsilon_K = 1,2 \cdot \varepsilon_{n\check{c}}$
- emisijski faktor čelika u smjeru normale <sup>[6]</sup> -  $\varepsilon_{n\check{c}} = 0,79$
- Stefan-Boltzmanova konstanta <sup>[6]</sup> -  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
- temperatura okoline -  $T_o = 298,15 \text{ K}$
- temperatura vanjske stijenke kalupa -  $T_{VK} = \max(T_{VK}', T_{VK}'')$
- površina emitirajućih stijenki zatvorenog kalupa -  $A_Z = 2 \cdot h_K \cdot (d_K + \check{s}_K)$
- površina emitirajućih stijenki otvorenog kalupa -  $A_O = A_Z + 2 \cdot A_{slj}$
- površina sljubnice otvorenog kalupa -  $A_{slj} = d_K \cdot \check{s}_K - S_M - S_{uk}$

$$\varepsilon_K = 1,2 \cdot 0,79 = 0,948 \quad (5.39.)$$

$$T_{VK}' = 0,427 \cdot T_o + 0,823 \cdot T_K - 68,96 \quad (5.40.)$$

$$T_{VK}' = 0,427 \cdot 298,15 + 0,823 \cdot 468,15 - 68,96 = 443,64 \text{ K} \quad (5.41.)$$

$$T_{VK}'' = T_o + 0,725 \cdot T_K - 211,4 \quad (5.42.)$$

$$T_{VK}'' = 298,15 + 0,725 \cdot 468,15 - 211,4 = 426,16 \text{ K} \quad (5.43.)$$

$$T_{VK} = 443,64 \text{ K} \quad (5.44.)$$

$$A_Z = 2 \cdot 0,168 \cdot (0,4 + 0,3) = 0,2352 \text{ m}^2 \quad (5.45.)$$

$$A_{slj} = 0,4 \cdot 0,3 - 0,017 - 0,006 = 0,097 \text{ m}^2 \quad (5.46.)$$

$$A_O = 0,2352 + 2 \cdot 0,097 = 0,4292 \text{ m}^2 \quad (5.47.)$$

$$\phi_{zr} = 0,948 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (298,15^4 - 443,64^4) \cdot (0,4292 \cdot \frac{60}{342,76} + 0,2352 \cdot \frac{282,76}{342,76})$$

$$\phi_{zr} = -446,11 \text{ W} \quad (5.48.)$$

Toplinski tok izmijenjen s mirujućim zrakom putem konvekcije može se izračunati kao zbroj toplinskih tokova odvedenih konvekcijom kada je kalup zatvoren i kada je kalup otvoren.

$$\phi_k = \phi_{kO} + \phi_{kZ} = \alpha_k \cdot (T_o - T_{VK}) \cdot (A_o \cdot \frac{t_p}{t_c} + A_z \cdot \frac{t_{umr}}{t_c}) \quad (5.49.)$$

gdje je:

- koeficijent konvektivnog prijelaza topline -  $\alpha_k = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\begin{aligned} \phi_k &= 15 \cdot (298,15 - 443,64) \cdot \left(0,4292 \cdot \frac{60}{342,76} + 0,2352 \cdot \frac{282,76}{342,76}\right) \\ \phi_k &= -587,4 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.50.)$$

Ostali gubitci topline izračunavaju se kao:

$$\phi_{ost} = 0,1 \cdot (-446,11 - 587,4 - 163,5) = -119,7 \text{ W} \quad (5.51.)$$

Toplinski tok izmijenjen s okolinom iznosi:

$$\phi_o = -446,11 - 587,4 - 119,7 = -1153,21 \text{ W} \quad (5.52.)$$

Iz toplinske bilance može se izračunati iznos toplinskog toka koji je potrebno dovesti kalupu od sustava za temperiranje.

$$\phi_{ST} = -\phi_o - \phi_T \quad (5.53.)$$

$$\phi_{ST} = 1153,21 + 163,5 = 1316,71 \text{ W} \quad (5.54.)$$

### 5.3. Analiza rezultata proračuna i kalupa za injekcijsko prešanje manžete

Svrha reološkog proračuna kalupa leži u otkrivanju dimenzija uljevnog sustava. Dimenzije uljevnog sustava imaju znatan utjecaj na tečenje kaučukove taljevine i ispravno popunjavanje kalupne šupljine, a o njima izravno ovisi koliko će iznositi pad tlaka u kalupnoj šupljini. Uljevni sustav mora se dimenzionirati tako da tlak ubrizgavanja preše bude veći ili jednak zbroju pada tlaka u uljevnom sustavu i tlaka u kalupnoj šupljini, nužnom za ispravno odvijanje prerade. Također, potrebno je izračunati vrijednost sile kojom je potrebno držati kalup zatvorenim kako ne bi došlo do njegova otvaranja i stvaranja srha na proizvodu. Analizom navedenih rezultata zaključuje se da je moguće izraditi gumenu manžetu od EPDM smjese, u kalupu oblikovanom u 5.2.1. i dimenzioniranom u 5.2.2., na predviđenoj preši proizvođača MAPLAN. Tome u prilog govore rezultati reološkog proračuna prema kojima preša može ubrizgati dovoljno volumena, ostvariti dovoljan tlak ubrizgavanja i dovoljno velikom silom držati kalup zatvorenim.

$$V_g = 423,745 \text{ cm}^3 < V_{uMAX} = 2000 \text{ cm}^3 \quad (5.55.)$$

$$p_u = 20,202 \text{ N/mm}^2 < p_{uMAX} = 21 \text{ N/mm}^2 \quad (5.56.)$$

$$F_d = 425,799 \text{ kN} < F_{dMAX} = 2500 \text{ kN} \quad (5.57.)$$

Toplinskim proračunom kalupa utvrđuje se vrijeme trajanja umrežavanja. Vrijeme umrežavanja govori koliko je potrebno zagrijavati taljevinu u kalupnoj šupljini kako bi se postigao optimalan stupanj umreženja. Iako umrežavanje čini većinu vulkanizacijskog ciklusa, potrebno je proračunati i ukupno vrijeme ciklusa. Temeljem proračunatih perioda, moguće je utvrditi profil temperatura kalupa. Za ispravno funkcioniranje sustava za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa potrebno je održavati ravnotežno toplinsko stanje kalupa, stoga se proračunati profil temperatura koristi kako bi se odradila toplinska bilanca kalupa. Konkretno, za ispravno injekcijsko prešanje manžete, opisanom je kalupu potrebno dovoditi oko 1,3 kW toplinskog toka od grijaćih ploča preše. Pokazuje se da je od ključne važnosti ispravno predgrijavanje kalupa, kako bi profil temperatura kalupa bio što ujednačeniji, odnosno kako bi se smanjile toplinske disipacije.

$$t_{umr} = 282,76 \text{ s} \quad (5.58.)$$

$$t_c = 342,76 \text{ s} \quad (5.59.)$$

$$\phi_{ST} = 1316,71 \text{ W} \cong 1,3 \text{ kW} \quad (5.60.)$$



## 6. ZAKLJUČAK

Iako je reakcija umrežavanja kaučukovih smjesa poprilično kompleksan fenomen, ona se danas provodi u mnogim industrijskim pogonima za proizvodnju gumenih tvorevina. Gumene tvorevine često se proizvode injekcijskim prešanjem što omogućava velikoserijsku proizvodnju u relativno kratkom vremenu. Specifičnost tog postupka prerade zahtijeva dobro poznavanje preradbenih svojstava kaučukove smjese. Poznavanje preradbenih svojstava tek je jedan od ulaznih parametara prema kojima se konstruira kalup za injekcijsko prešanje. Kvalitetan opis preradbenih svojstava osigurava provođenje proračuna i iznalaženje rezultata koji dovoljno dobro opisuju tijek proizvodnog ciklusa.

Metodički pristup razvoju kalupa za injekcijsko prešanje omogućuje manje iskusnim inženjerima da razrade kvalitetan koncept kalupa. Uz definiranje elemenata kalupa, važno je svaki element ispravno oblikovati. Proračun kalupa je od presudne važnosti; njime je moguće dovoljno dobro dimenzionirati elemente kalupa i osigurati izradu gumenih proizvoda zahtijevanih svojstava, oblika i dimenzija. Proračun ujedno omogućuje iterativnu optimizaciju elemenata kalupa kako bi se iznašli zadovoljavajući parametri prerade. Valja napomenuti kako koraci optimizacije omogućuju izradu kompaktnijih kalupa čime se smanjuje potrošnja materijala za izradu i količina zahtijevane strojne obrade. Danas postoje programski paketi za analizu injekcijskog prešanja polimera.

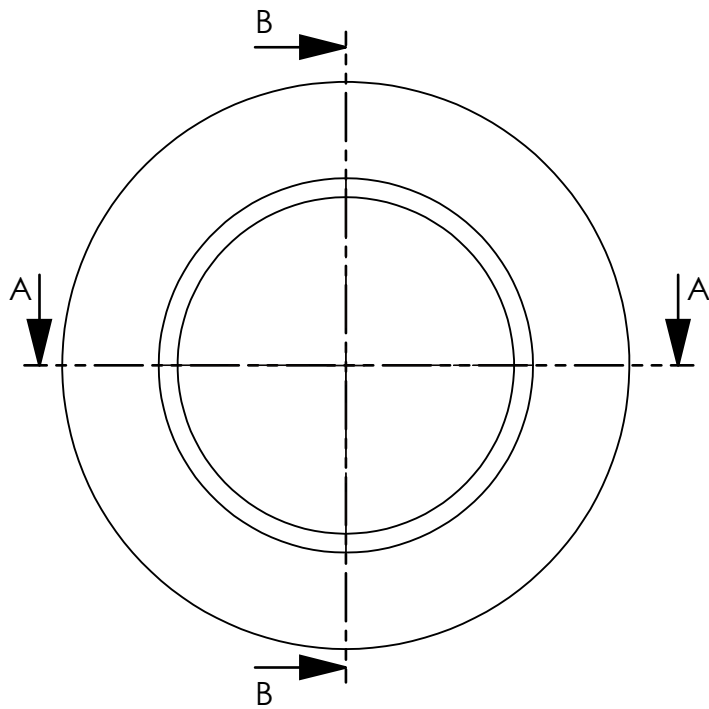
Čak i kvalitetno razvijen kalup za injekcijsko prešanje kaučukovih smjesa nalazi se na kušnji prilikom izrade prve serije proizvoda. Kao i u svim koracima razvoja konstrukcije kalupa, tako i u ovom koraku iskustvo proizvođača dolazi do izražaja. Temeljem analize gumenih tvorevina prve serije, proizvođač može spoznati do kojih eventualnih problema dolazi u preradbenom procesu pa je tako u najgorem slučaju potrebno izvesti korekcije na kalupu. Iskusni proizvođač gumenih tvorevina u praksi može razriješiti gotovo sve probleme regulacijom parametara prerade. Tako se promjenom temperature kalupa, volumena i tlaka ubrizgavanja može izravno utjecati na tijek prerade te osigurati proizvodnja gumenih tvorevina visoke kvalitete.

## 7. LITERATURA

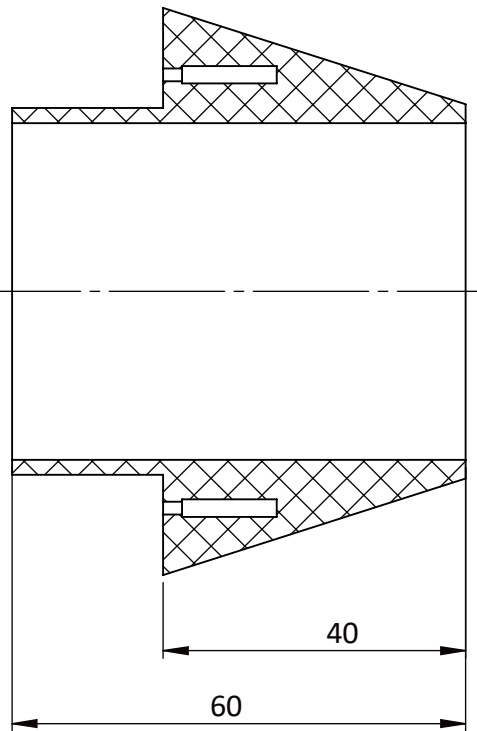
- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.
- [2] Schaeffler: Technical pocket guide, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach, 2018.
- [3] Šercer, M.: Proizvodnja gumenih tvorevina, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 1999.
- [4] Godec, D.: Projektiranje alata i naprava (podloge za predavanja), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [5] Gent, A. N.: Engineering with rubber, Hanser Gardner, Munich, 2001.
- [6] Halasz B., Galović A., Boras I.: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [7] Podloge za vježbe iz Uvoda u termodinamiku, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [8] Kućan, M.: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [9] Šalov, I.: Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [10] [www.polymerprocessing.com](http://www.polymerprocessing.com) (15.12.2022.)
- [11] <http://polymerdatabase.com/Elastomers/SBR.html> (15.12.2022.)
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-EPDM-monomer\\_fig1\\_291523288](https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-EPDM-monomer_fig1_291523288) (15.12.2022.)
- [13] <http://polymerdatabase.com/Elastomers/NBR.html> (15.12.2022.)
- [14] <https://www.maplan.at/en/loesungen/models/> (17.1.2022.)
- [15] <https://repinjection.com/index.php/component/content/article/36.html> (17.1.2022.)

## **PRILOG**

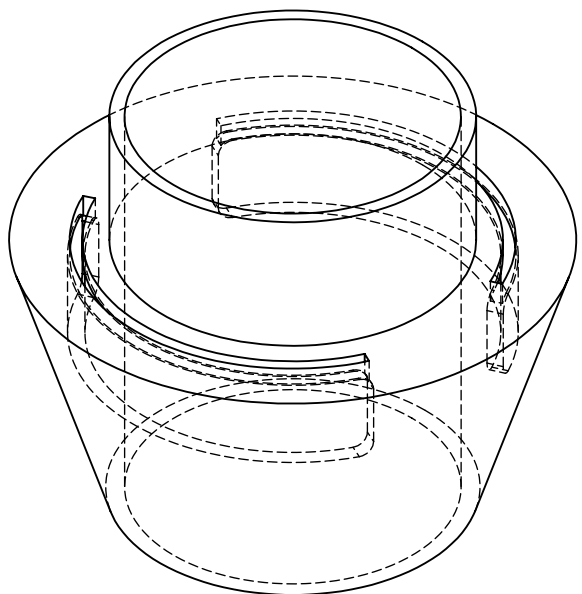
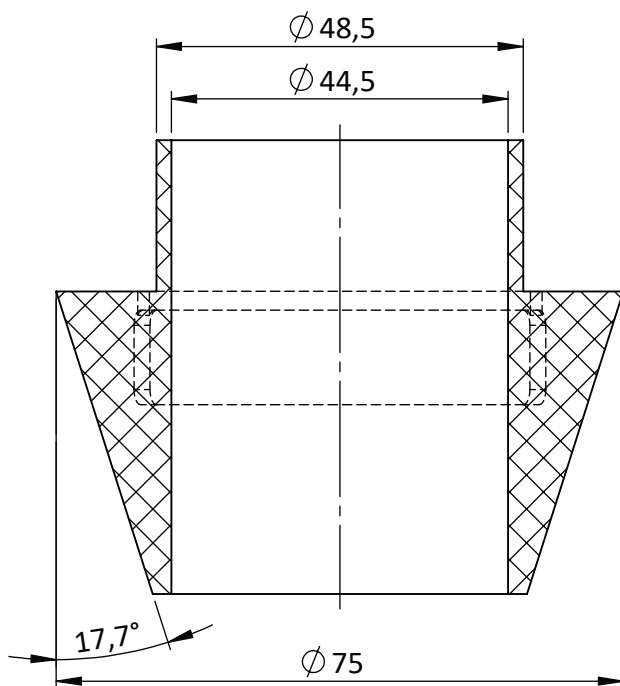
### **I. Tehnička dokumentacija**



Presjek B-B:



Presjek A-A:



	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	12.8.2020.	F. Andabaka	
Razradio	12.8.2020.	F. Andabaka	
Crtao	12.8.2020.	F. Andabaka	
Pregledao			



Objekt:	Objekt broj:
	R. N. broj:

Napomena:	Kopija
-----------	--------

Materijal: EPDM 60 ShA	Masa: 72 g	
------------------------	------------	--

 Mjerilo originala 1:1	Naziv:	Pozicija:	Format: A4 Listova: 1 List: 1
	Manžeta	1	
	Crtež broj: 14022022		



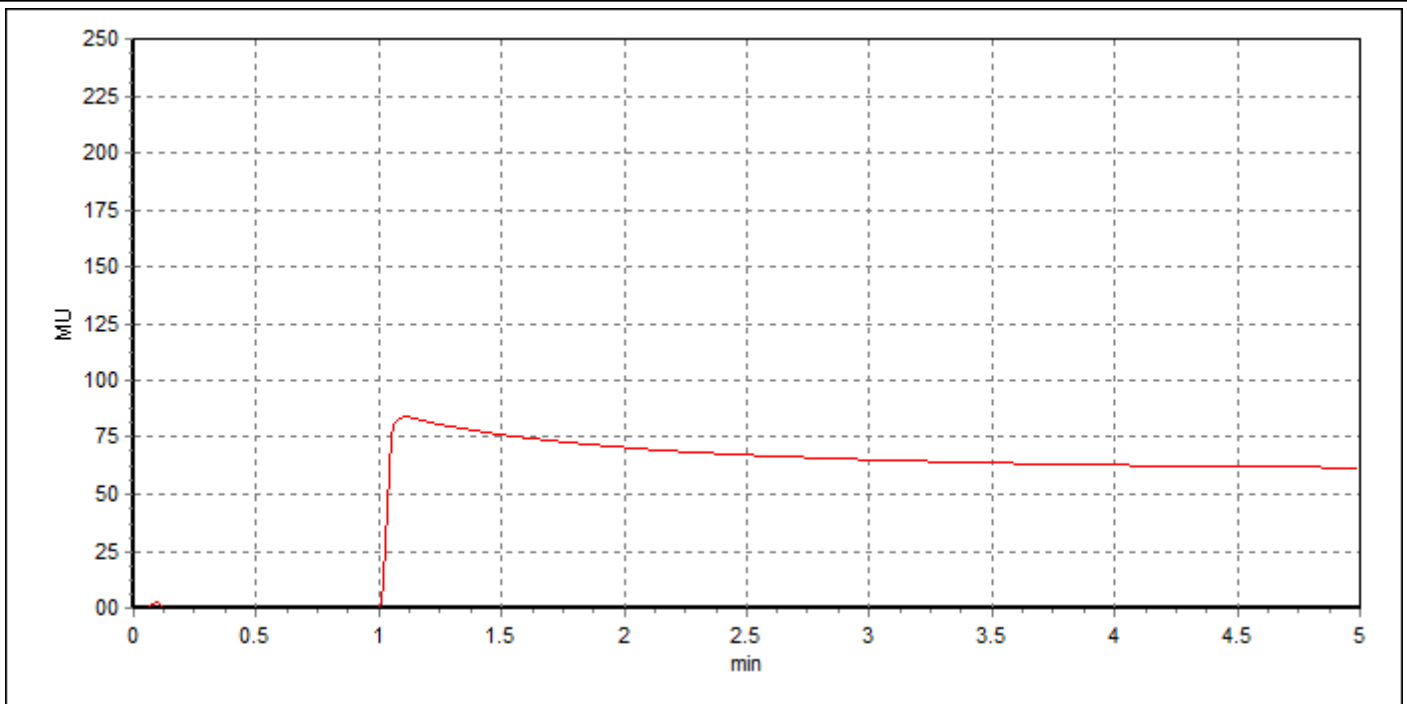
# EPDMs6001c 210608 (6673)

## MooneyCheck

Identification		Identification		ISO 289 - Visc.100°C 1+4 min	
Job:	(Generic)	Produit	Compound 01	Temps de préchauffage	1.0 min
Commande:	EPDMs6001c	Code produit:	001	Viscosité Test Time	4.0 min
Lot	210608	Traitement	Original State	Temps de relaxation de contraction	0.1 min
Date:	24/06/2021	Client:	<Generic>	Dies Température	100.0 °C
Instrument	MCC 2015051	Code client:	0	Rotor (0=Large 1=Small)	0.0
		Usager	Dalibor Buhin	Tolérance de température	1.0 °C

ShoreA Hardness 60  
 IRHD Hardness 0  
 Density [g/cm3] 0

Notes:



Batch:	MUini	MUmin	MU 4	S 4
	MU	MU	MU	MU/min
Max.Tol				
Min. Tol				
■ 6673	84.04	61.69	61.66	-1.12

Max	
Min	
moyenne	
St.Dev	
CP	
Cpk	

Signature \_\_\_\_\_

MUini:Maximum de viscosité Mooney; MUmin:Viscosité Mooney Minimum; MU:Viscosité à temps choisi; S:Taux de Réduction de viscosité;



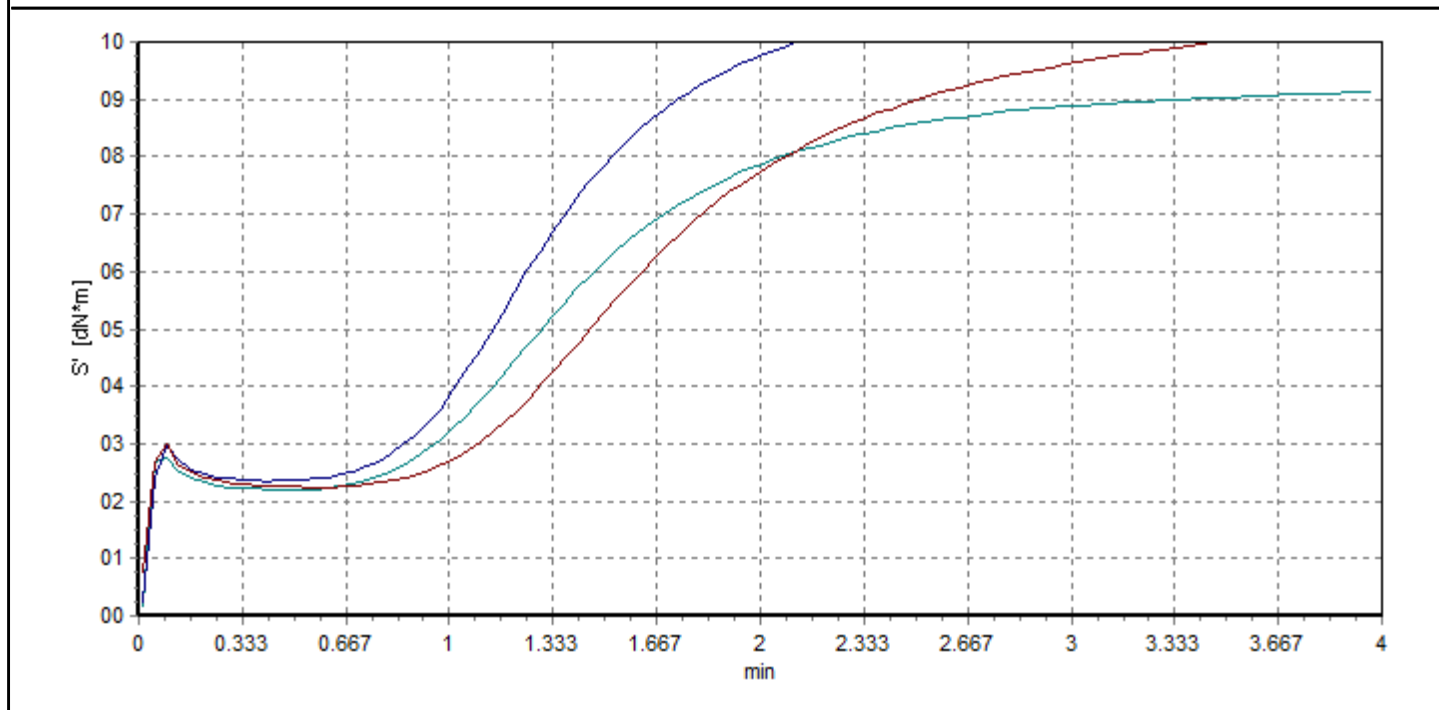


# EPDMs6001c 220101 (960-962)

## RheoCheckMD

Identification		Identification		MD 170°C 4min	
Job	(Generic)	Product	Gibitre 75	Oscillation angle	0.5 deg
Order	EPDMs6001c	Product Code		Upper Plate Temperat.	170.0 °C
Lot	220101	TreatmentID	Original State	Lower Plate	170.0 °C
Date :	20/01/2022	Customer	<Generic>	Test Time	4.0 min
Instruments :	RCO 2015051	Customer Code	0	Temperature Tolerance	0.5 °C
		User	Dalibor Buhin		

Durezza shore A : \_\_\_\_\_ Notes \_\_\_\_\_  
 Durezza IRHD : \_\_\_\_\_  
 Densita g/cm3 : \_\_\_\_\_



Batch	ML dN*m	Ts 1 mm.cc	Ts 2 mm.cc	t' 50 mm.cc	t' 90 mm.cc	MH dN*m
Max (Warn.)						
Min (Warn.)						
960	2.20	1.00	1.17	1.40	2.37	9.14
961	2.35	0.92	1.07	1.34	2.29	11.15
962	2.24	1.15	1.33	1.66	2.83	10.26
Max	2.35	1.15	1.33	1.66	2.83	11.15
Min	2.20	0.92	1.07	1.34	2.29	9.14
Mean	2.26	1.02	1.19	1.47	2.50	10.18
St.Dev	0.0777	0.1168	0.1311	0.1701	0.2914	1.0072
Cp						
Cpk						

Signature \_\_\_\_\_

ML:Minimum torque; Ts:Time for defined torque increase; t':Time to % vulcanization; MH:Maximum Torque;

