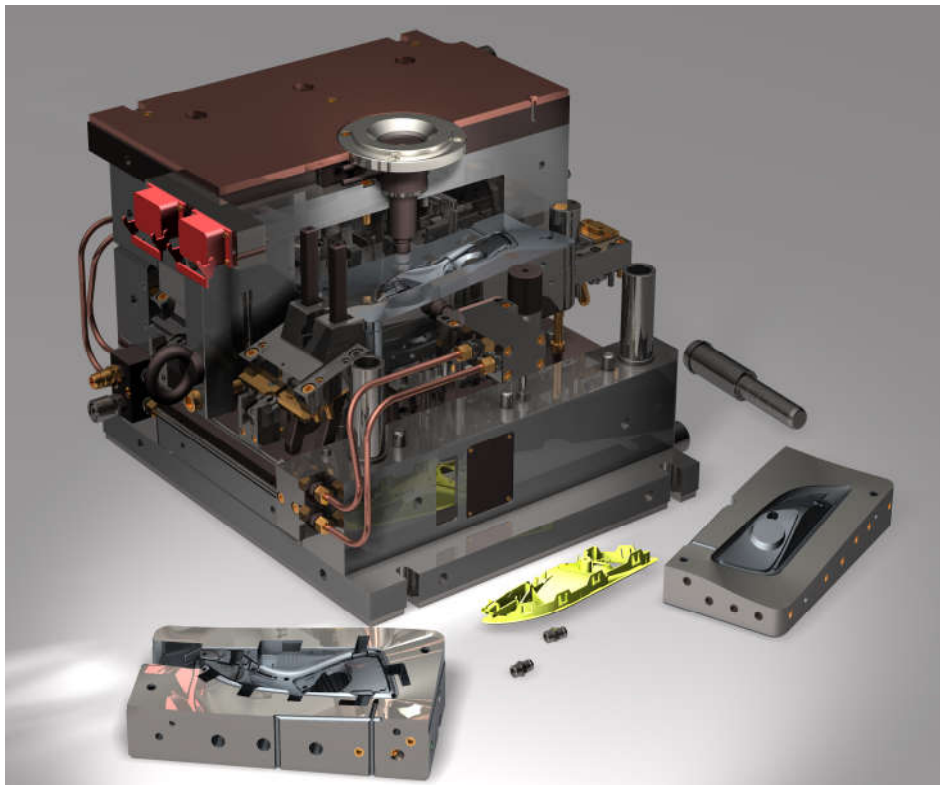


UNIVERZITET U NOVOM SADU
Fakultet tehničkih nauka
Departman za proizvodno mašinstvo

Prof. Dr Dragiša Vilotić

TEHNOLOGIJA INJEKCIONOG PRESOVANJA POLIMERA

(TOP)

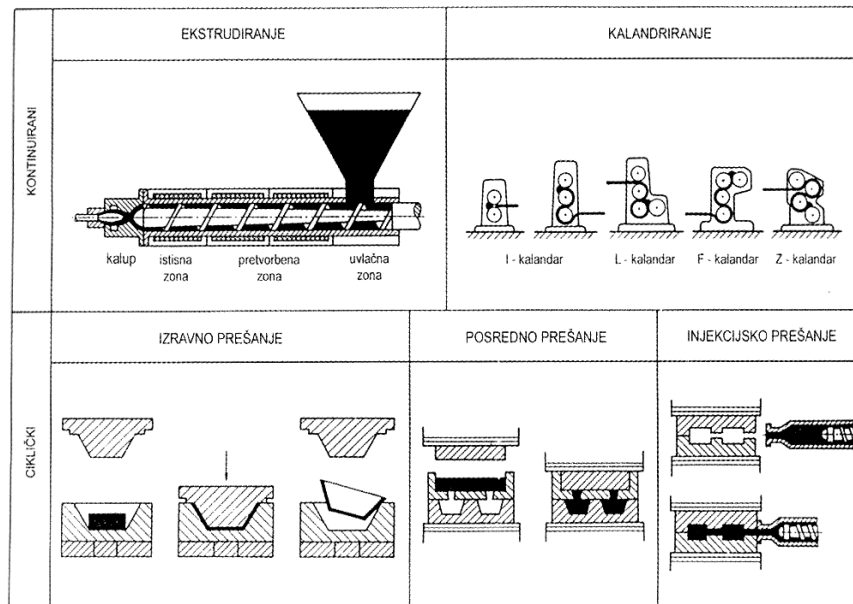


Novi Sad, novembar 2007.

1. KLASIFIKACIJA POSTUPAKA PRERADE POLIMERA

Podela postupaka prerade polimera može se izvršiti prema različitim kriterijumima. Tako na primer, prerada polimera može biti prerada sa skidanjem materijala (rezanje) i prerada bez odvajanja materijala (livenje, ekstruzija, presovanje...). S obzirom na tok odvijanja procesa prerada polimera može biti ciklična i kontinualna. Detaljna podela postupaka prerade polimera data je u knjizi prof. Čatića [1]. Prema ovom autoru, u postupke prerade polimera spadaju:

1. **PRIMARNA PRERADA ili praoblikovanje** polimera, koja obezbeđuje izradu proizvoda određenog oblika i fizičko-mehaničkih i drugih osobina, od polaznog materijala koji nema određenu formu (na primer od granulata, praha, rastvora, rastopa itd.). Primarna obrada postoji i u proizvodnji i u preradi metala, i omogućuje izradu polufabrikata od rude i drugih dodataka.
Praoblikovanjem polimera dobijaju se, najčešće, poluproizvodi koji se dalje mogu prerađivati drugim postupcima u gotove plastične proizvode.
2. **Postupci OBLIKOVANJA** – koji omogućuju dalju preradu primarno dobijenog polufabrikata.
3. **Obrada rezanjem** – u koju spadaju struganje, glodanje, sečenje, brušenje, bušenje i druge metode primenjene na obradu polimernih materijala.
4. **Obrada spajanjem** – gde spada spajanje pomoću zavrtnajskih i drugih mehaničkih veza, spajanje zavarivanjem, lepljenjem itd.
5. **Površinska obrada** – u koju spadaju postupci bojenja i lakiranja, reljefnog oblikovanja, galvanizacija, prevlačenje drugim materijalima itd.



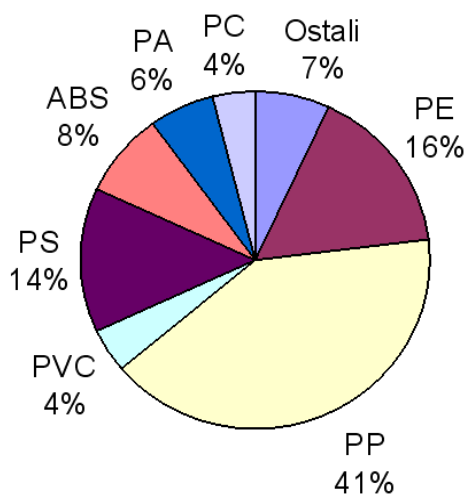
Slika 1.1 Osnovni postupci primarne obrade plastike

2. INJEKCIONO PRESOVANJE

2.1 Uvod

Injekciono presovanje je najvažniji ciklički postupak prerade polimera, a prema dostignutoj tehnologiji i najusavršeniji. Ovaj postupak spada u primarnu preradu polimera tj. u praobliskovanje polimera, jer se oblik otpreska dobija od polaznog materijala koji nema određenu formu (granule, komadići i sl.) Injekcionim presovanjem se oblikuju svi polimeri: duromeri, elastomeri, elastoplastomeri, a posebno je raširena prerada plastomenih materijala. Prema prerađenim količinama injkciono presovanje polimera je odmah iza tehnologije ekstrudiranja. Može se smatrati da je injkciono presovanje polimera slično livenju pod pritiskom metala. Injekcionim presovanjem se osim polimera prerađuju se i keramičke smeše, kombinacije različitih materijala (npr. plastika, metal i keramika) i biomaterijali. Prema prof. Čatiću [1] postoji najmanje 240 postupka sličnih injkcionom presovanju polimera.

Procesom injkcionog presovanja obrađuju se mnogi materijali koji su većinom iz grupe termoplasta. Na slici 2.1 dati su udeli pojedinih vrsta materijala prerađenih ovim procesom u Zapadnoj Evropi 2002. godine.

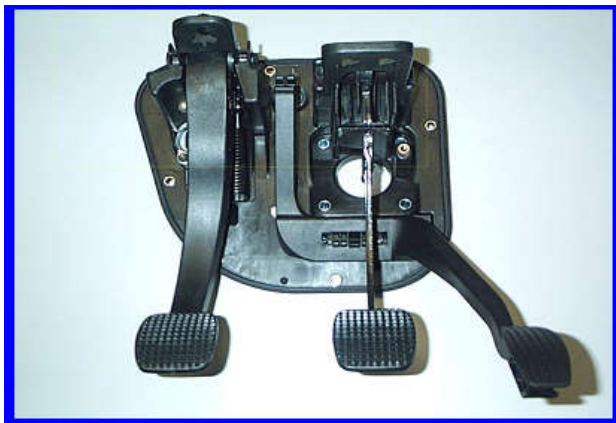
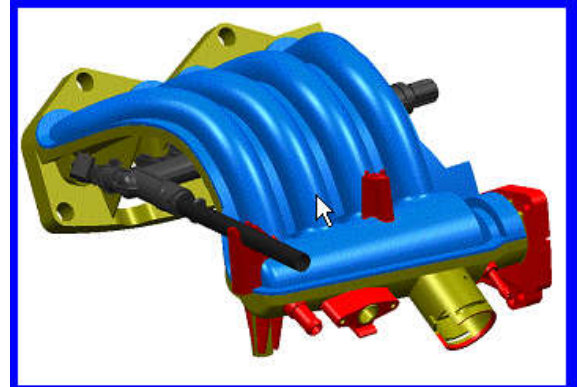


Slika 2.1 Procentualna raspodela učešća pojedinih vrsta plastomera u preradi injkcionim presovanjem [1]

Delovi dobijeni injkcionim presovanjem imaju veliku primenu u:

- *automobilskoj industriji i tarsportnoj tehnici i saobraćaju uopšte*
- *elektro i elektronskoj industriji*
- *hemijskoj i farmaceutskoj industriji*
- *industriji hrane, pića i poljoprivrednoj tehnici*
- *medicinskoj industriji*
- *industriji kućnih aparat i uređaja itd.*

Na slici 2.2 prikazani su primeri delova dobijenih injekcionim presovanjem koji pokazuju stepen složenosti delova koje moguće prizvesti ovom tehnologijom. Ova tehnologija omogućuje izradu ugradbeno gotovih delova visokog kvaliteta po pristupačnoj ceni.



Slika 2.2 Ilustracija primene proizvoda dobijenih injekcionim presovanjem

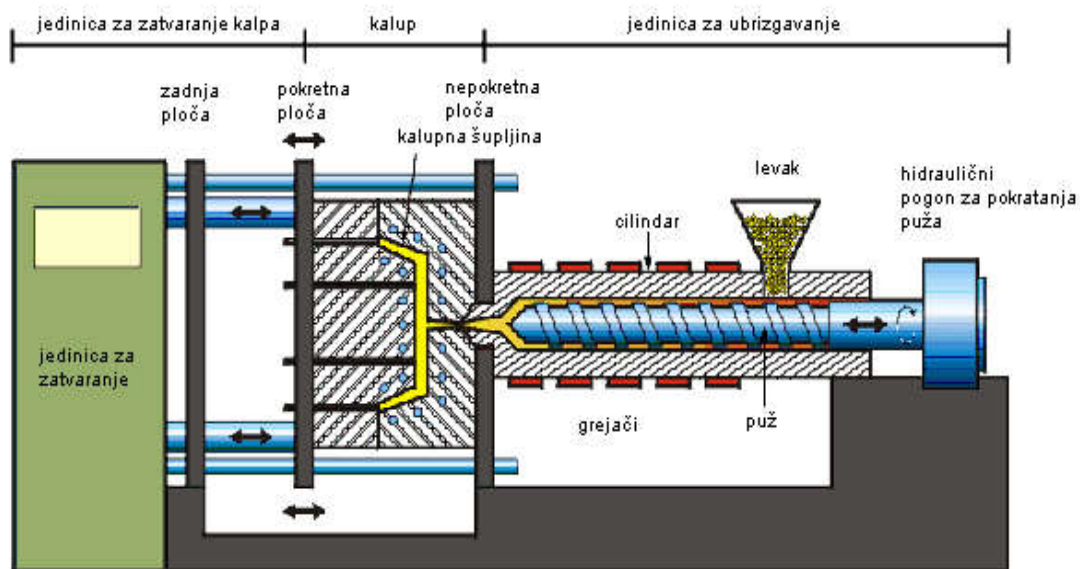
2.2 Materijali za injekciono presovanje

Skoro svi termoplastični materijali mogu se koristiti pri injekcionom presovanju. Svaki proizvođač materijala dužan je da uz materijal dostavi i parametre procesa pri kojima se dati materijal može koristiti. Te preporuke dalje se prilagođavaju za svaki ciklus injekcionog presovanja, da bi se postigao minimalni potrebni ciklus sa optimalnim performansama i kvalitetom otpreska. Za ovu vrstu oblikovanja povoljniji su materijali sa nižom viskoznošću, zbog lakšeg protoka rastopa kroz razvodne kanale i ušće do kalupne šupljine. Zbog male viskoznosti materijala potreban je i manji injekcioni pritisak.

Neki termoset materijali se takođe mogu koristiti za injekciono presovanje, ali su potrebni specijalni uslovi. Potrebno je zadržati nisku temperaturu u cilindru, zatim odnos L/D puža treba da je što manji, i ciklus što brži. Uslovi prerade elastomera injekcionim presovanjem takođe se značajno razlikuju od uslova prerade termoplasta i bliži su uslovima prerade termoseta.

2.3 Definicija i postupci injekcijskoga presovanja

Injekcijsko presovanje je ciklični proces primarnog oblikovanja (praoblikovaja) polimera koji se izvodi ubrizgavanjem rastopljenog polimera određene viskoznosti iz injekcione jedinice u temperiran kalup. Obradak u kalupu očvršćava hlađenjem (u slučaju termoplastičnih materijala) ili umrežavanjem u slučaju elastomera, elastoplastomera i duromera.

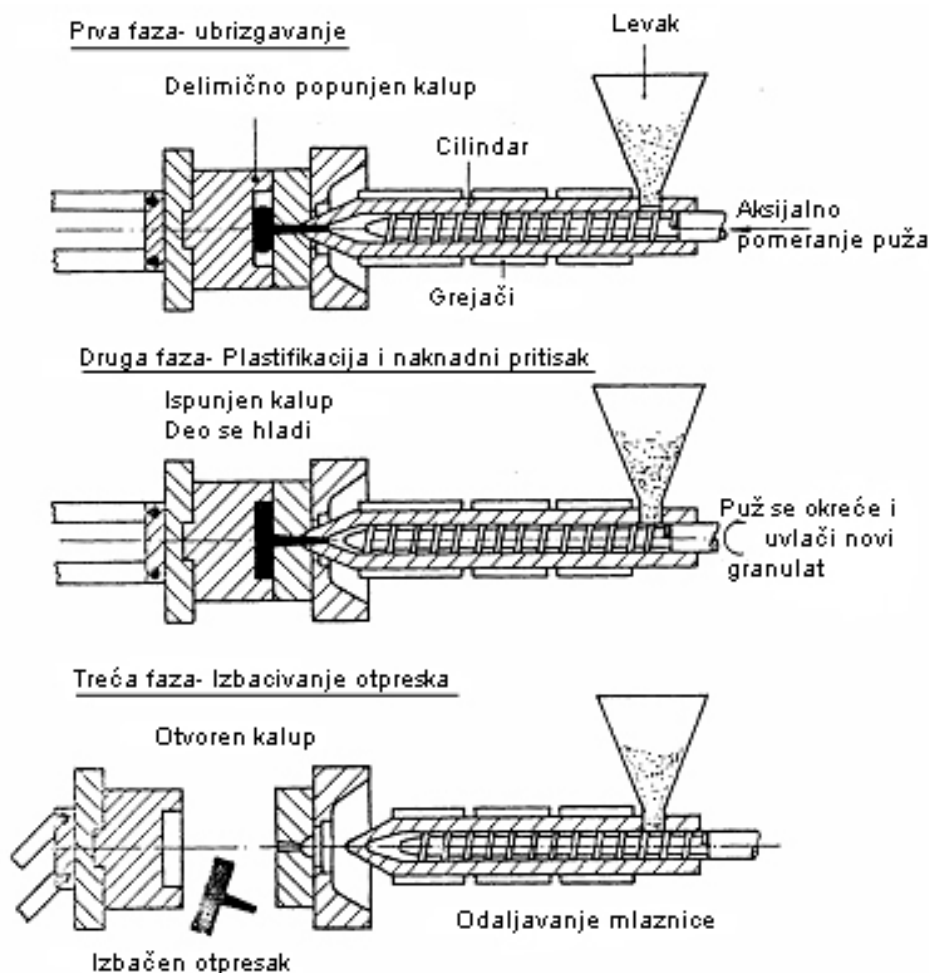


Slika 2.3 Šema mašine sa alatom za injekciono presovanje

Injekciono presovanje izvodi se na specijalnim mašinama (slika 2.3) koje se sastoje od injekcione jedinice, pogonskog sistema, jedinice za zatvaranje kalupa, uređaja za temperiranje kalupa i upravljačke jedinice.

Proces injekcionog oblikovanja odvija se u nekoliko faza (slika 2.4) od kojih tri osnovne:

1. U prvoj fazi aksijalnim pomeranjem puža rastopljeni materijal se preko ulivnih i kanala ubrizgava u šupljinu kalupa. Pri tome je isključena rotacija puža a njegovo aksijalno pomeranje ostvaruje hidraulični cilindar.
2. U drugoj fazi obradak se hladi uz intezivnu cirkulaciju rashladnog sredstva kroz sistem za hlađenje alata. Pri tome, puž deluje na rastopljeni materijal naknadnim pritiskom, kako bi se nadoknadio nedostatak materijala usled skupljanja otpreska pri hlađenju. Nakon završenog hlađenja otpreska, tj. na kraju faze delovanja naknadnog pritiska, puž se vraća unazad, rotira i uvlači novu količinu granulata, topi ga i plastificira.
3. Poslednja faza je otvaranje kalupa i izbacivanje obratka. Injekciona jedinica se vraća u nazad a mlaznica se zatvara pomoću ventila. Otvaranje kalupa obezbeđeno je sistemom za otvaranje koji s obzirom na pogon može biti mehanički ili hidraulični. Obradak se iz kalupa izbacuje pomoću izbacivača a izvlačenje viška materijala iz ulivne čaure vrši izvlakač.



Slika 2.4 Faze injektionog presovanja: 1- ubrizgavanje, 2-plastifikacija, 3-izbacivanje [4]

Otpresci dobijeni injeksiinim presovanjem različitih su dimenzija i mase koja se meri delovima miligrama pa do približno 180 kg. Najmanji poznati plastomerni otpresak koji se koristi u medicini ima toliku masu da 7,25 milijuna komada nastaje od 1 kg materijala. Injekciono presovanje je pogodno za proizvodnju vrlo komplikovanih obradaka sa

tolerancijama od nekoliko mikrometara. Otpresci dobijeni ovom tehnologijom mogu biti višedelni i višebojni, mogu se proizvoditi u kombinaciji sa metalnim ulošcima, mogu biti kruti (čvrsti) i penasti. Proizvodnja otpresaka može teći neprekidno dvadeset četiri sata na dan.

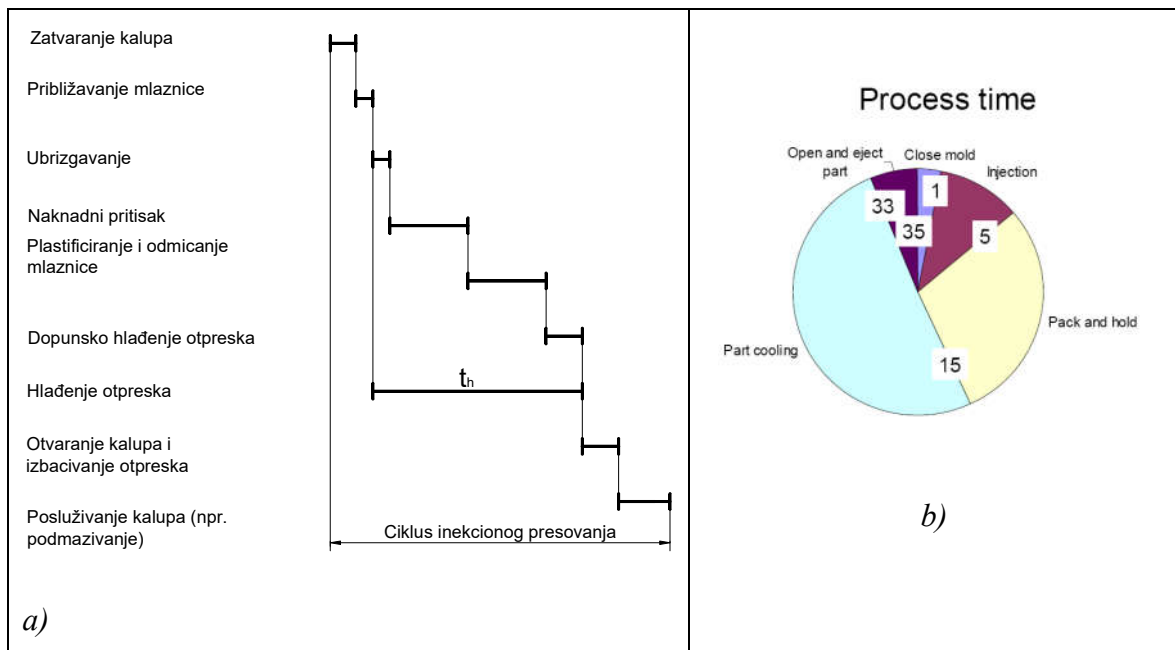
Radni ciklus injekcijskog presovanja

Radni ciklus injektionog presovanja je vreme potrebno za izradu jednog (ili više otpresaka ako alat sadrži više kalupnih šupljina), odnosno to je vreme koje protekne između dve istoimene faze u procesu injektionog presovanja. Radni ciklus započinje komandom zatvaranje kalupa a završava se komandom posluživanje kalupa. Vremenski dijagram sa aktivnostima tokom injektionog presovanja otpresaka termoplasta, prikazan je na slici 2.5a i sadrži sledeće faze.

- Zatvaranje kalupa, koje u vrlo kratkom vremenskom periodu izvodi jedinica za zatvaranja.
- Potom sledi približavanje injektionice jedinice ka nepokretnoj ploči a ova faza se završava naslanjanjem mlaznice na ulivnu čauru.
- Ubrizgavanje rastopljene mase u kalupnu šupljinu je sladeća faza. Potreban pritisak rastopa obezbeđen je aksijalnim kretanjem puža, odnosno, hidrauličnim cilindrom. Pritisak ubrizgavanja zavisi od vrste polimera a kreće se od **500 do 3000 bara**, što obezbeđuje pritisak u kalupu reda veličine **1000 bara**. Brzina ubrizgavanja je **2 m/s**.
- Sa završetkom faze ubrizgavanja počinje faza hlađenja otpreska. U jednom delu ove faze pritisak u cilindru ima nižu vrednost od pritiska ubrizgavanja i predstavlja naknadni pritisak. Naknadni pritisak obezbeđuje dodatnu količinu rastopa u kalupnoj šupljini zbog skupljanja otpreska pri hlađenju.
- Odmicanje mlaznice i početak ponovne plastifikacije počinje u trenutku prekida dejstva naknadnog pritiska, kada puž počinje da se obrće i uvlači novu količinu granulata.
- Ako hlađenje otpreska nije završeno ono se nastavlja u periodu dodatnog vremena hlađenja.
- Otvaranje kalupa i izbacivanje otpreska izvodi se nakon njegovog potpunog očvršćavanja, odnosno hlađenja.
- Na kraju ciklusa injektionog presovanja kalup se priprema za naredni ciklus, čisti se i podmazuje a eventualno se ubacuju metalni ulošci.

Radni ciklus injektionog presovanja kaučuka (elastomera) sličan je ciklusu pri oblikovanju plastomera a razlika postoji u fazi hlađenja, odnosno umrežavanja koje je prisutno kod elastomera [1].

Vreme radnog ciklusa u najvećoj meri određeno je vremenom hlađenja otpreska. Na slici 2.5b prikazan je odnos veličina pojedinih faza u ciklusu injektionog presovanja.



Slika 2.5 Ciklus inekcionog presovanja (a) i učešće pojedinih faza u ciklusu (b)

2.4. Alati za inekciono presovanje

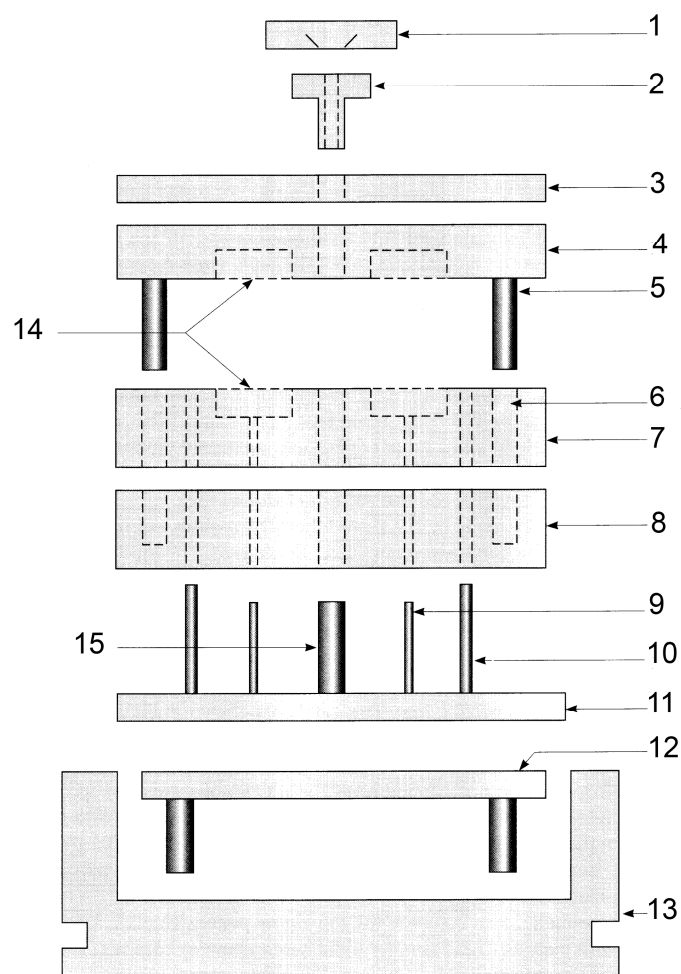
Alat je jedan od osnovnih elemenata obradnog sistema za inekciono presovanje koji neposredno oblikuje otpresak. Za svaki novi oblik obradka potreban je novi alat. Otpresak se nakon ubrizgavanja hladi u kalupu pa zbog toga alat mora biti priključen na uređaj za temperiranje. Nakon završnog očvršćavanja otpreska sledi otvaranje kalupa i njegovo izbacivanje pomoću **izbacivača**. Izvlačenje ostataka ulivnog sistema izvodi **izvlakač**. **Kalupi** su postavljeni na odgovarajuće **ploče kućišta** alata, od kojih se jedna polovina vezuje za pokretnu ploču mašine a druga za nepokretnu. Vođenje ploča kućišta obezbeđeno je cilindričnim **vodicama**. Ploče kućišta mogu biti pravougaone ili kružne.

Ukupna sila presovanja, koja zvisi od projekcije grozda obradaka i pritiska polimera, prenosi se preko ploča na sisitem za zatvaranje.

Kalupna šupljina sastoji se iz dva dela koji su razdvojeni **podeonom ravni**. Pokretanje izbacivača ostvaruje se automatski pri vraćanju pokretne ploče u otvoreni položaj. Profil izvlakača može se različito oblikovati sa ciljem da se obezbedi izvlačenje zaostalog materijala iz ulivne čaure. Specijalizovani proizvođači proizvode unificirane delove alata za inekciono presovanje.

Osnovni elementi alata za inekciono presovanje prikazani su na slici 2.6.

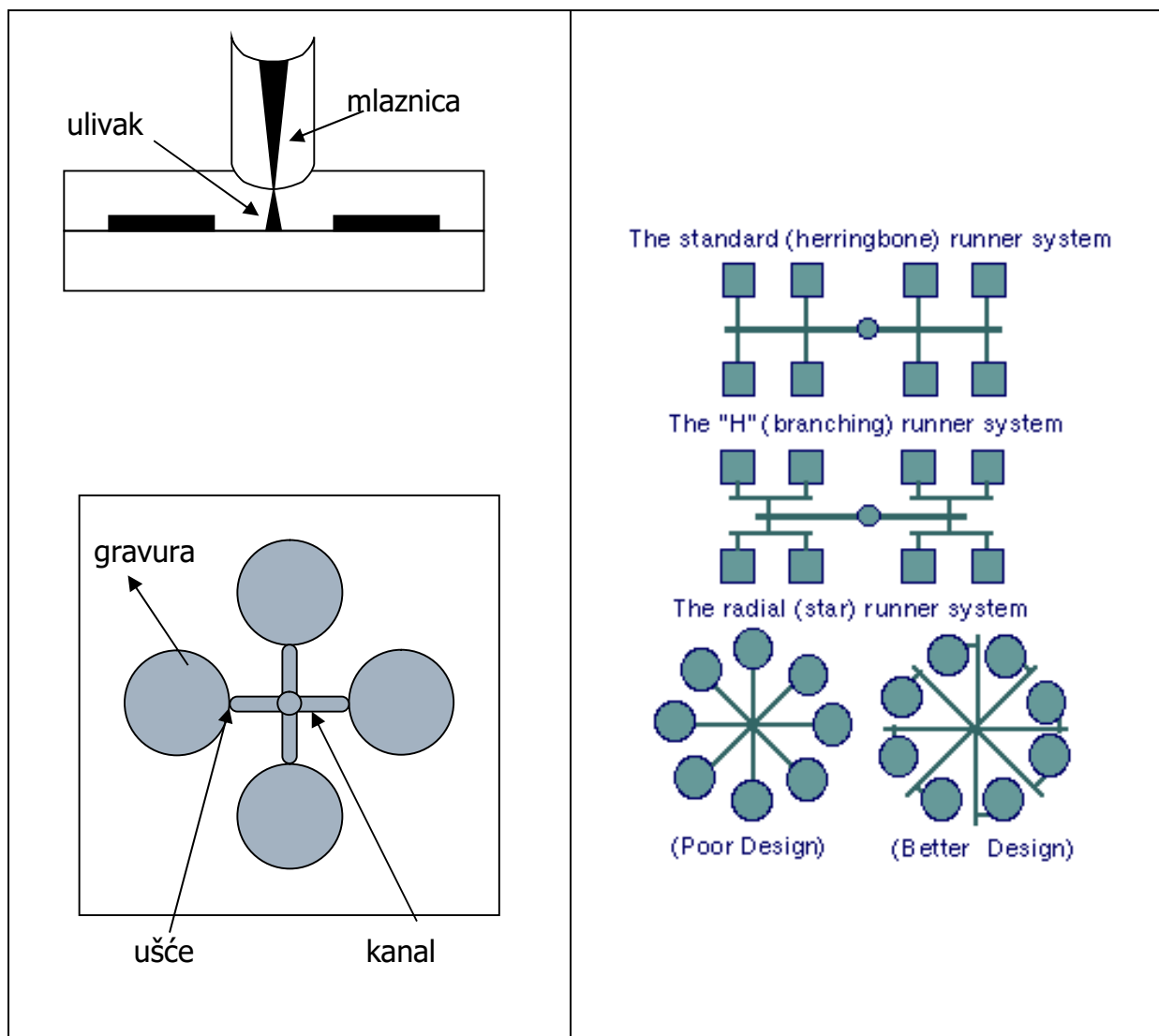
Ubrizgavanje rastopljenog polimera iz cilindra mašine izvodi se preko **ulivnog sisitema** koji započinje **ulivnim kanalom**, zatim slede **razvodni kanali** a na ulazu u šupljinu nalazi se **ušće**. Presek ulivnih i razvodnih kanala može biti različit, kao i oblik ušća za koje postoje posebne preporuke u specijalizovanoj literaturi, [1,4,9]. Vrsta ušća i njegove dimenzije utiču na karakter tečenja polimera kroz šuplinu kalupa.



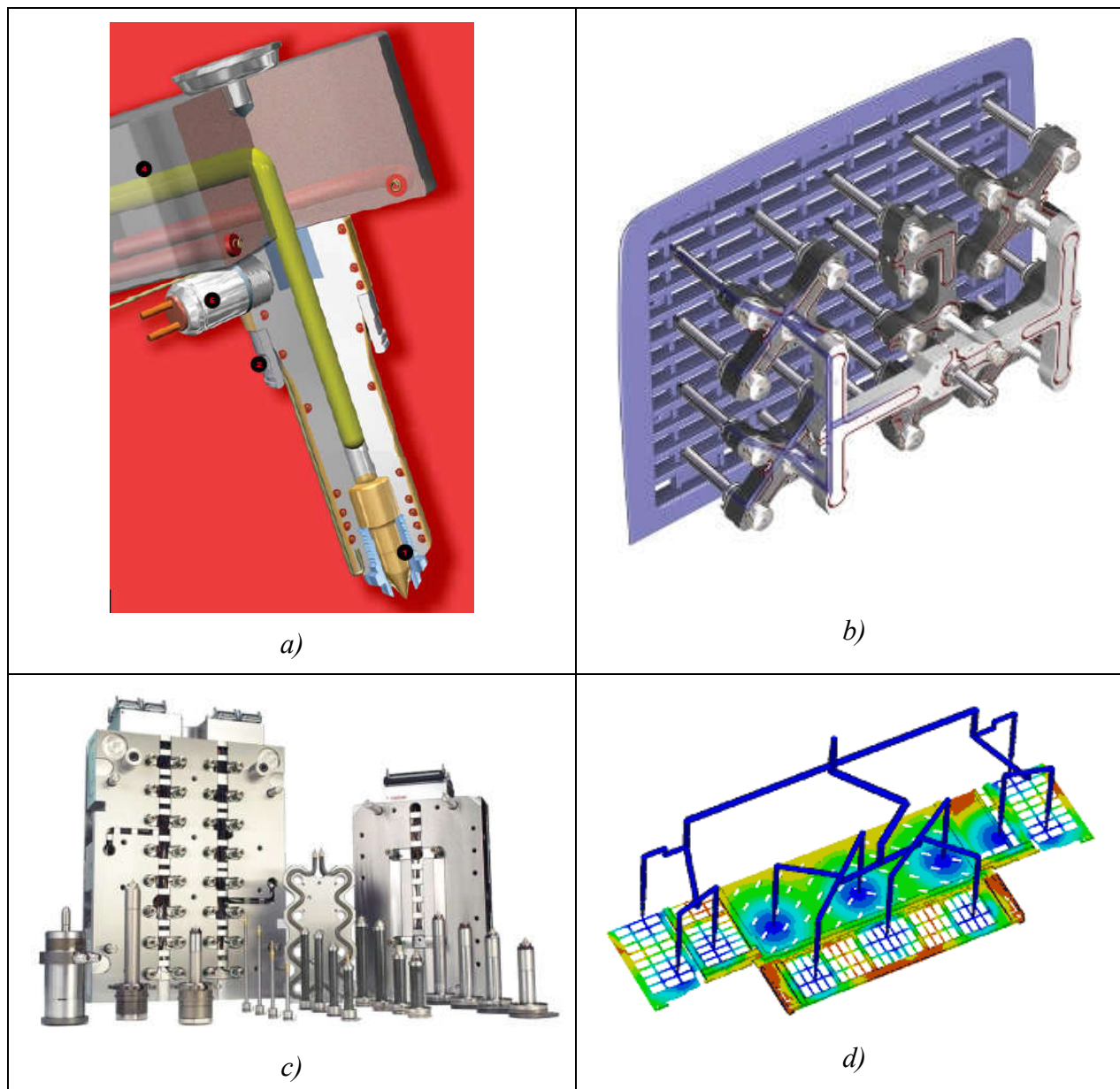
Slika 2.6 Elementi alata za injekciono presovanje [9]:

*1- čaura za centriranje mlaznice 2-ulivna čaura 3-ploča 4-nepokretni kalup 5- stub vođice
6-vodeća čaura 7-pokretni kalup 8-potporna ploča 9-izbacivač 10-šipka za vraćanje
izbacivača 11-prateće ploča izbacivača 12-pogonska ploča izbacivača 13-kućište izbacivača
14 garavura (šupljina) kalupa 15-izvlakač*

Ulivni sistem može biti hladan, i topao (vruć). U prvom slučaju ulivni sistem se mora odvojiti od otpreska nakon završenog hlađenja. Kod presovanja sitnijih komada postoji mogućnost izrade više otpresaka istovremeno koji se napajaju rastopljenim materijalom preko razgranatog ulivnog sistema, koji mora biti projektovan tako da se popunjavanje svih gravura vrši istovremeno.



Slika 2.7 Elementi haldnog ulivnog sistema [1,9, 18, 24]: a)šema, b)konstrukcije varijante



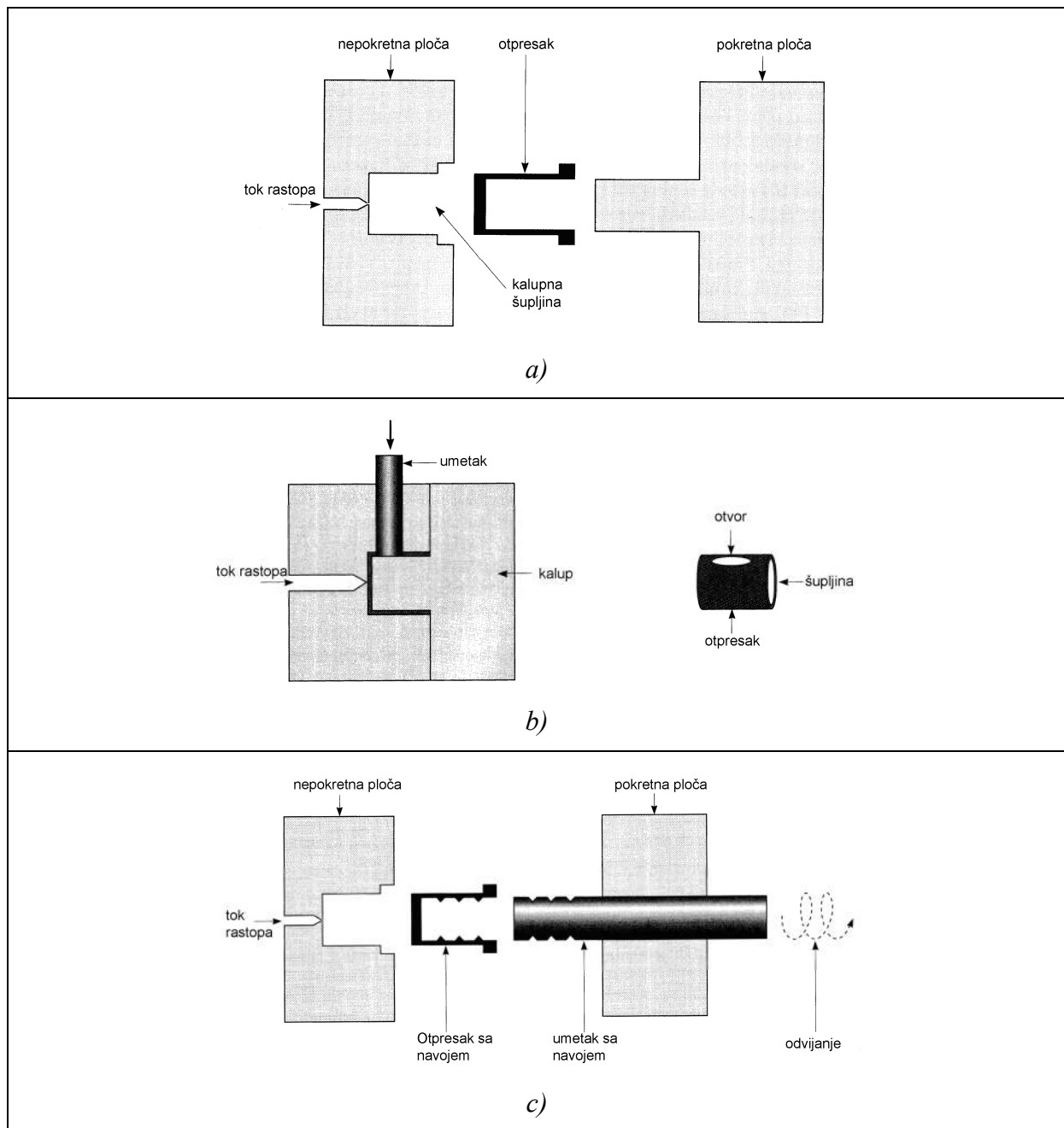
Slika 2.8 . Topli ulivni sistem [22, 24]: a) šema tople mlaznice, oblikovanje složene rešetke sa toplim ulivnim sistemom c) alat sa toplim ulivnim sistemom Husky d) optimiranje položaja toplog ulivnog sistema Husky

Topli ulivni sistem je idealni ulivni sistem koji obezbeđuje besprekorno napajanje kalupa rastopljenim polimerom, bez gubitka materijala, bez pada pritiska u kalupu i uz skraćenje ciklusa pri injekcionom presovanju.

Šupljina u kalupu – gravura po svom obliku u potpunosti odgovara obliku obratka sa dimenzijama uvećanim zbog hlađenja obratka nakon izbacivanja. Broj podeonih ravni zavisi od oblika obratka a u tom smislu kalupi se dele na:

- kalupi sa jednom podeonom ravni
- kalupi sa dve podeone ravni
- kalupi sa tri i više podeonih ravni

Prema obliku obratka kalupi mogu biti (slika 2.9.):



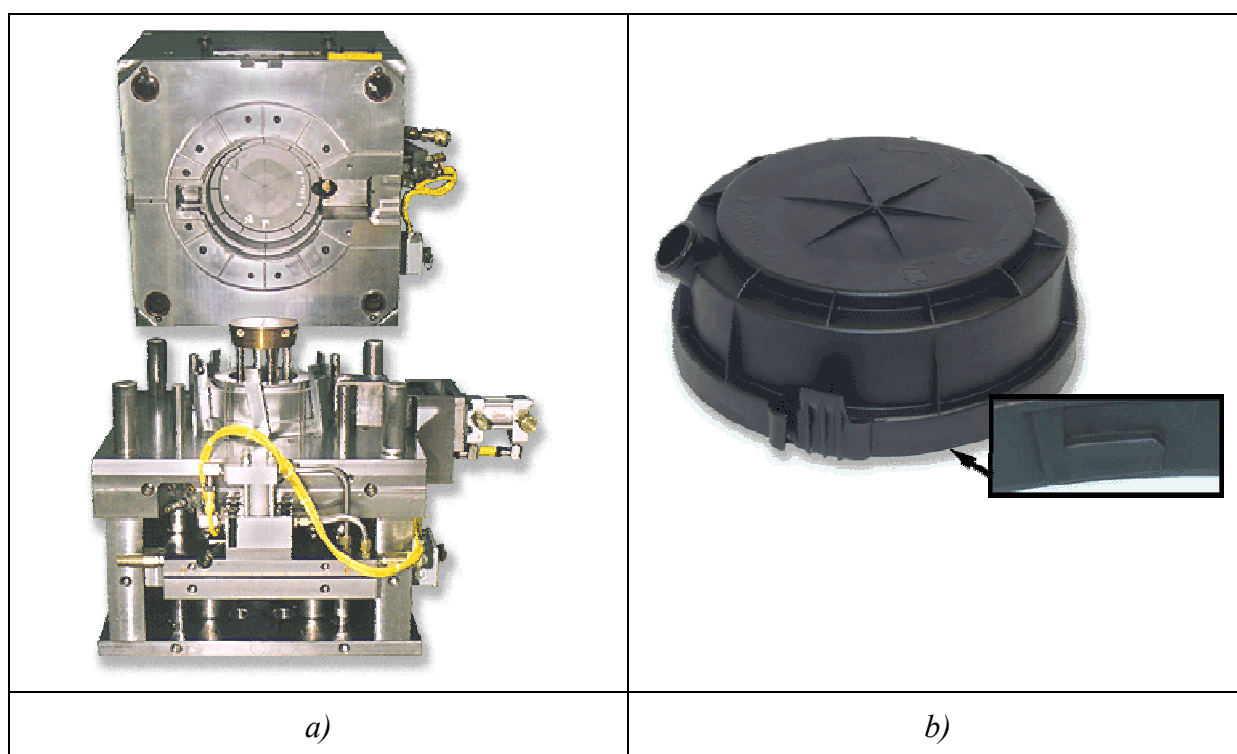
Slika 2.9 Vrste kalupa [9]

- kalupi za jednostavne oblike obratka
- kalupi za složene oblike
- kalupi za obratke sa umetcima
- kalupi za obratke sa spoljnim navojem
- kalupi za obratke sa unutrašnjim navoje.



Slika 2.10. Linije zavarivanja

Linije zavarivanja (slika 7.4.) čest su problem kod injekcionog presovanja a nastaju uled susreta struja rastopljenog polimera koje teku u suprotnim smerovima. Posebno se pojavljuju u zonama otvora i umetaka od drugog matrijala (na primer, metalni ulošci). Linije zavarivaja generalno su nepoželjne a problem se rešava pravilnom konstrukcijom alata.



Slika 2.11 Alat za injekciono presovanje(a) otpreska (b)

Konstrukcija alata u najvećoj meri određena je stepenom složenosti otpreska, vrstom materijala, zahtevanom tačnošću, veličinom serije i drugim rparametrima. Na slici 2.11 prikazan je izgled jednog složenog alata za izradu poklopca usisivača injekcionim presovanjem.

2.5 Uloga pojedinih elemenata alata

Ulivni sistem

Ulivni sistem služi za dovođenje rastopljene mase iz mlaznice do kalupne šupljine i mora biti izveden tako da se dobije kvalitetan obradak. Sastoji se od:

- a) Dovodnog (ulivnog) kanala
- b) Razvodnih kanala (primarnih i sekundarnih)
- c) Ulaznog kanala (ušće)

Dovodni (ulivni) kanal služi za povezivanje mlaznice sa razvodnim kanalom. Nalazi se u ulivnoj čauri a posle završenog ubrizgavanja zaostali materijal se hladi i vadi pomoću izvlakača. Osa dovodnog kanala mora biti u osi mlaznice.

Razvodni kanali služe za razvođenje rastopljenog materijala od ulivka do ulaznog kanala. Profil razvodnog kanala može biti: kružni, polukružni, trapezni itd. Dimenzije razvodnih kanala su veoma važne.

Ulazni otvor – ušće propušta rastopljenu masu iz razvodnog kanala u kalupnu šupljinu. Ulazni kanal može biti (a) restriktivan (b) nerestriktivan.

Ulazni kanal ima sledeće funkcije:

- Regulaciju protoka i pravca tečenja rastopa
- Olakšava odvajanje ulivnog sistema od obradka
- Brzo se hladi i sprečava povratno tečenje iz šupljine kalupa.

Restriktivni ulazni kanal:

- a) Generiše energiju trenja pri prolazu rastopljenog materijala i olakšava tečenje
- b) Smanjuje zaostale napone u obradku
- c) Skraćuje vreme hlađenja i vreme ciklusa

Prilikom određivanja dimenzija kalupne šupljine mora se imati u vidu **skupljanje** obradaka nakon hlađenja koje je prisutno kod svih vrsta plastike.

Skupljanje zavisi od sledećih faktora:

1. *Temperature obrade*
2. *Vrste polimera*
3. *Uslova tečenja u alatu*
4. *Pritiska tečenja*
5. *Aditiva u materijalu*

Dimenzije kalupne šupljine su veće od dimenzija obradka:

$$L_K = L_0(1 + \alpha)$$

L_0 – dimenzija obradka

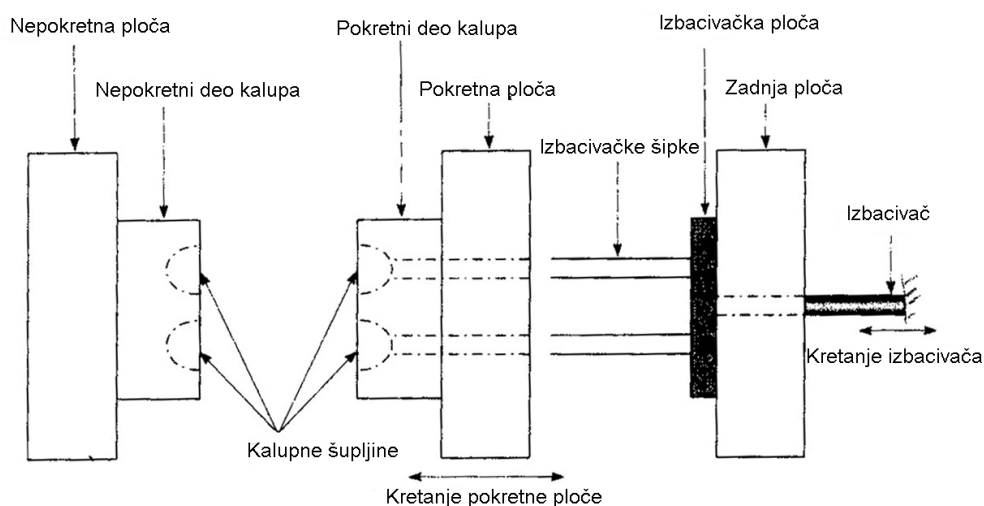
α - faktor skupljanja - tabela 1

Tabela 1

Faktor skupljanja(α)	Tip materijala
0-0,002	Polyester(termoset) BMC,SMC
0,001-0,004	Polycarbonate, 20% fiberglass
0,002-0,008	Acrylic
0,002-0,003	PVC
0,004-0,007	ABS
0,004-0,006	Polystyrene
0,005-0,007	Polycarbonate
0,005-0,008	Polyphenylene oxide
0,008-0,015	Nylon (6/6)
0,010-0,020	Polpropylene
0,018-0,023	Acetal
0,007-0,025	LDPE
0,020-0,040	HDPE

Izbacivač

Izbacivač ima zadatak da izbaci komad iz alata. U alatu se po pravilu, nalaze izvršni elementi izbacivača u obliku šipke odgovarajućeg prečnika koje se pokreću preko zajedničke ploče pri otvaranju alata. Pogonska ploča izbacivača može biti pokrenuta preko pogonske šipke što se dešava pri otvaranju alata usled pomeranja pokretnog sklopa alata.



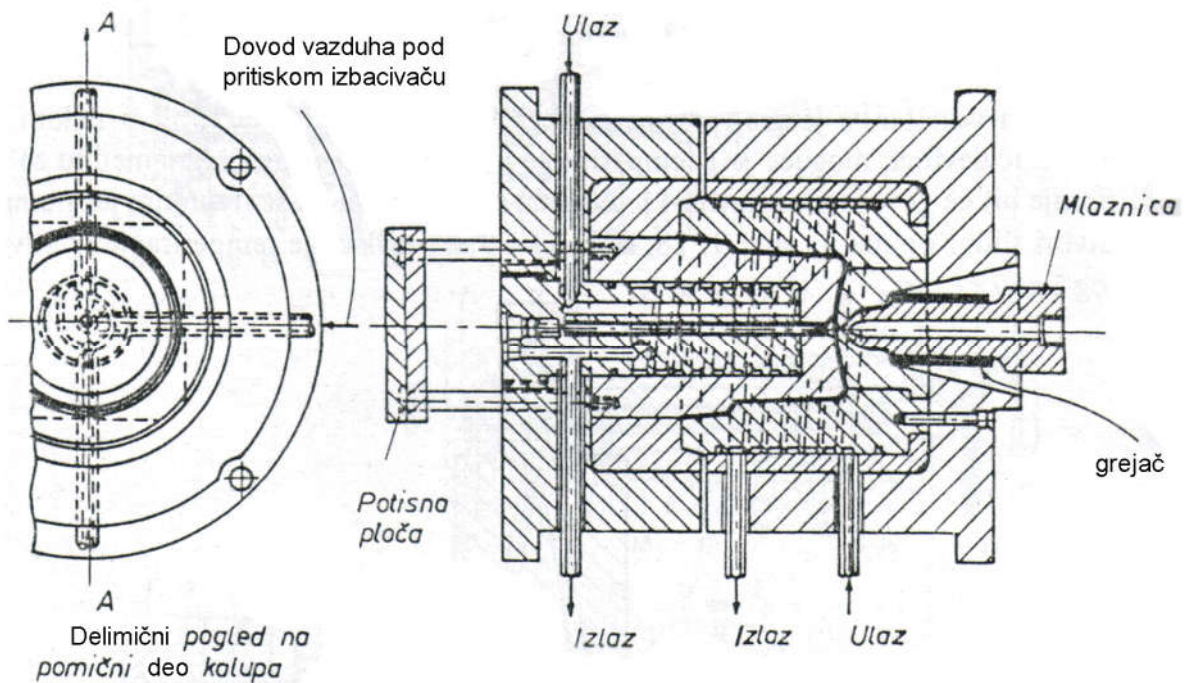
Slika 2.12 Pogon izbacivača

Izvlakač

Ovaj element alata služi za izvlačenje ulivka. Obično ja konstruisan kao šipka sa posebnim završetkom koji obliva plastika tako da čvrsto stoji posle hlađenja radi obezbeđenja izvlačenja ulivka. Odvajanje ulivka od izvlakača mora biti lako.

Sistem hlađenja kalupa

Očvršćavanje obradka u kalupu nastaje usled odvođenja toplote od rastopljene mase. Vreme hlađenja utiče na dužinu trajanja ciklusa presovnja, a zavisi pre svega od dimenzija obradka, temperature i pritiska ubrizgavanja i vrste materijala obradka. Manji delovi se uvek brže hlade od većih. Ponavljanjem ciklusa ubrizgavanja povećava se količina toplote u kalupima pa bi njihovo prirodno hlađenje usporilo proces proizvodnje. Radi toga se kalupi hlade prinudnom cirkulacijom rashladnog fluida koji je u najvećem broju slučajeva voda iz vodovoda. Obično se hlade obe polovine kalupa (nepokretna i pokretna) i na njima su ugrađeni odgovarajući priključci za vodu i elastična creva. Intezitet hlađenja može se regulisati cirkulacijom (provođenjem) vode kroz cevi za hlađenje. Osim kalupnih šupljina moraju se hladiti i jezgra kalupa. Hlađenje jezgra može se vršiti pomoću komprimovanog vazduha. Hlađenje elemenata alata za izradu čaše prikazano je na slici 2.13.



Slika 2.13 Hlađenje alata za injeksiono presovanje

2.6 Mašine za injeksiono presovanje

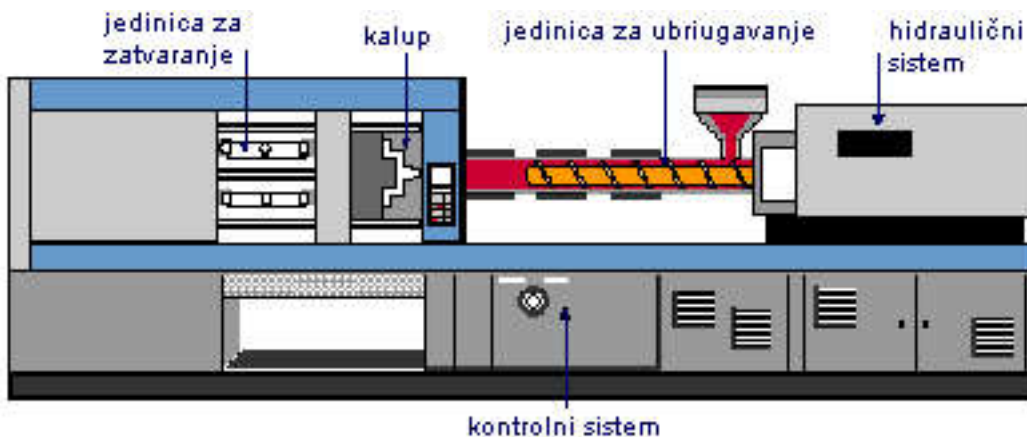
Mašina za injeksiono presovanje definiše se kao postrojenje diskontinulnog – cikličnog dejstva koja omogućuje primarno oblikovanje predmeta od makromolekularnog materijala. Oblikovanje se izvodi u kalupu pod dejstvom pritiska. Rastopljeni materijal (polimer) se iz cilindra pod dejstvom pritiska puža, pomoću mlaznice i ulivnog sistema, dovodi do gravure kalupa koju popunjava i u kojoj se hladi. Nakon toga sledi otvaranje kalupa i izbacivanje gotovog komada.

Važne funkcije mašine za injekciono presovanje su:

- *priprema rastopa (plastifikacija) za ubrizgavanje*
- *ubrizgavanje rastopa u kalup*
- *otvaranje i zatvaranje kalupa*
- *vađenje otpreska.*

Mašina za injekciono presovanje (slika 7.6.) sastoji se od sledećih podsistema:

- *Injekciona jedinica – jedinica za ubrizgavanje*
- *Sistem za zatvaranje kalupa*
- *Pogonski sistem*
- *Sistem za podmazivanje*
- *Uređaj za temperiranja*
- *Kontroln-oupravljački sistem*
- *Sistem za zaštitu poslužioca od povreda*
- *Sistem za zaštitu mašine od havarije*
- *Noseća struktura mašine*



Slika 2.14 Šema mašine za injekciono presovanje

Jedinica za ubrizgavanje

Jedinica za ubrizgavanje ima zadatak da prihvati sirovi materijal, da ga zagreje, rastopi, plastificira, zatim da ga ubrizga u kalup i održi pod naknadnim pritiskom određeno vreme.

Jedinica za ubrizgavanje može biti:

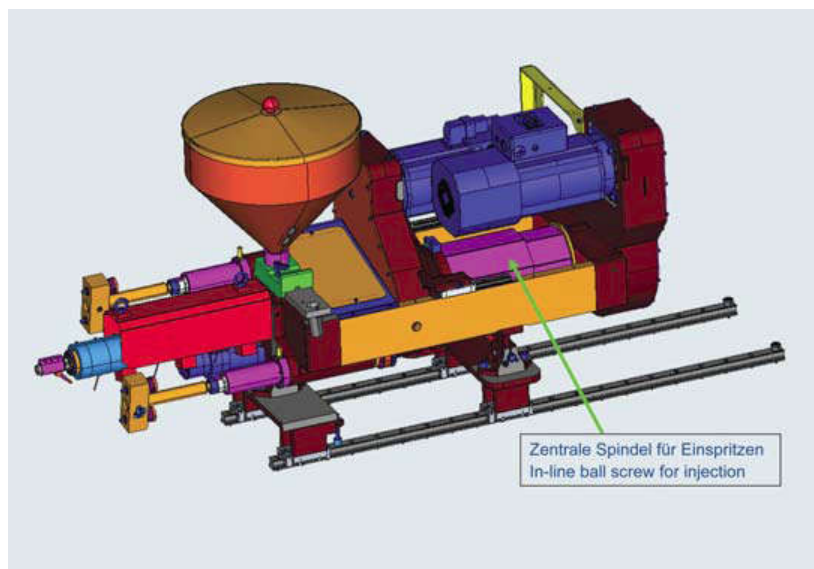
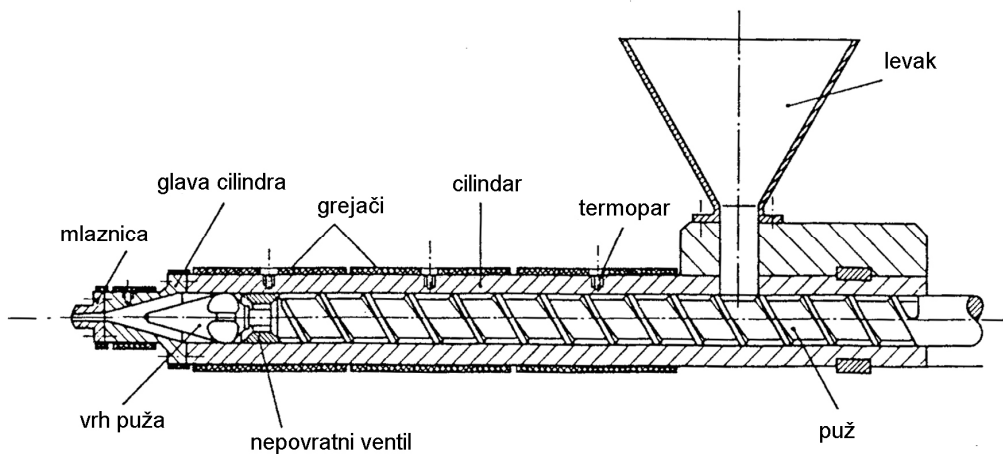
- *linijska sa aksijalno pomerljivim pužem.*
- *jednostepena sa klipom*
- *dvostepena sa klipom i pužem sa pužnom plastifikacijom*

Jednostepena injekciona jedinica sa klipom interesantna je za manje mašine, sa klipom prečnika 10-20mm. Današnje moderne mašine grade se sa aksijalno pomerljivim pužem (slika 7.7.).

Najvažnije funkcije injekcione jedinice su:

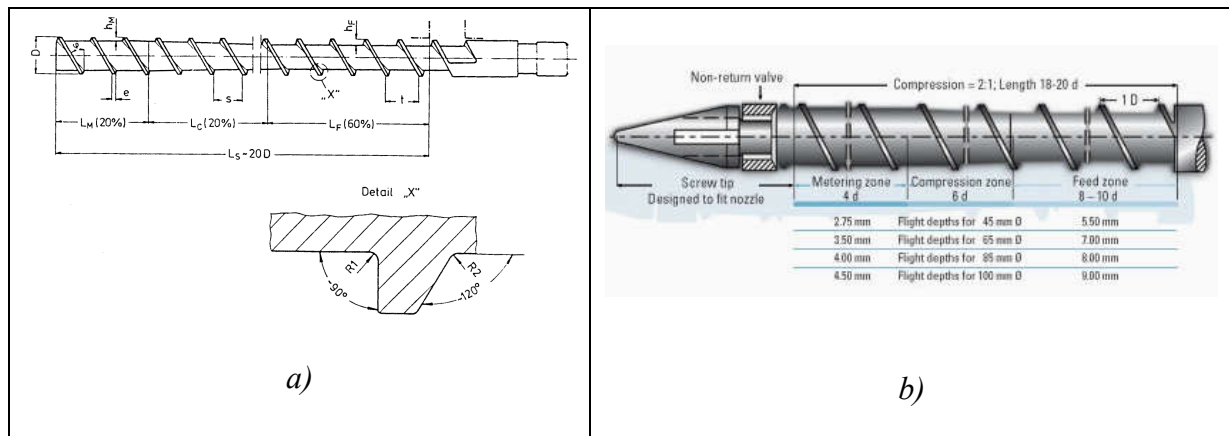
- *pomeranje do kontakta mlaznice i ulivne čaure*
- *generisanje kontaktnog pritiska između mlaznice i ulivne čaure*
- *rotiranje puža*
- *aksijalno pomeranje puža za vreme ubrizgavanja*
- *stvaranje naknadnog pritiska*

Injekciona jedinica sadrži dva osnovna elementa: **cilindar za topljenje** i element za ubrizgavanje - **puž ili klip**. Vrste jedinica za ubrizgavanje, a time ujedno i mašine za injekciono presovanje razlikuje se prema načinu plastifikacije polimera (**pužna ili klipna plastifikacija**).



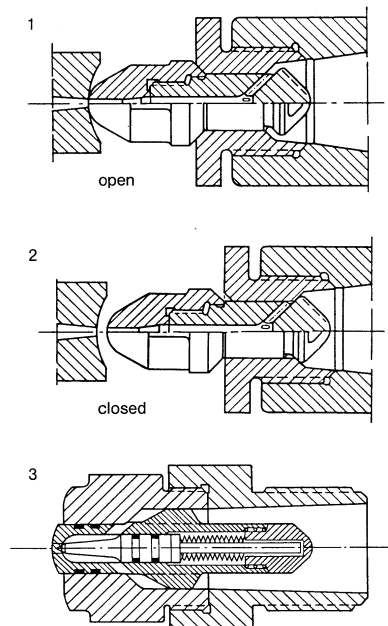
Slika 2.15 Jedinica za ubrizgavanje [4]

Za preradu plastomera najčešće se primjenjuje tzv. univerzalni pužni vijak. To je univerzalni trozonski puž dužine $L=(12 - 24)D$, pa i više.



Slika 2.16. Univerzalni trozonski puž: a) L_f – zona punjenja, L_c – kompresiona zona, L_m – zona potiskivanja [4]; b) Dimenzije puža

Na vrhu cilindra nalazi se **mlaznica** sa odgovarajućim ventilom kojim se reguliše protok rastopljenog polimera. Mlaznica sa spoljne strane ima sferični oblik radi smanjenja kontaktnog pritiska pri naleganju na ulivnu čauru. Zadatak mlaznice je da spoji kalup sa ulivnim cilindrom i da obezbedi potrebnu brzinu ubrizgavanja.

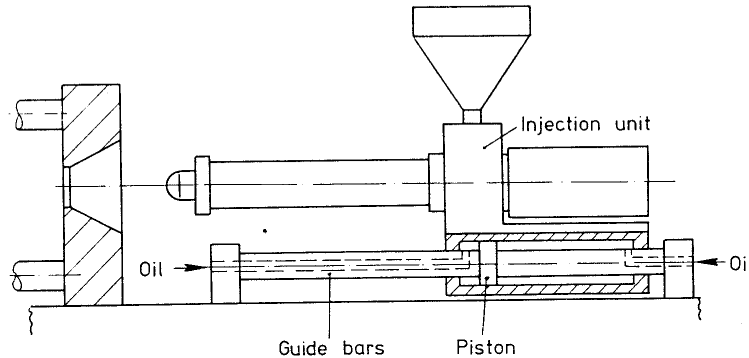


Slika 2.17 Mlaznica sa automatskim ventilom (samozatvarajuća) koji se aktivira: 1,2) kontaktnim pritiskom b) pomoću opruge [1]

Mlaznice mogu biti otvorene i samozatvarajuća (slika 2.17.). Otvorene mlaznice su jednostavnije, mogu se upotrebljavati kod plastomera visoke viskoznosti, npr. PS-a ili CA-a. Samozatvarajuće imaju veliku primenu kod savremenih mašina za injekciono presvanje. Sistemi aktiviranja mogu biti različiti [1,4].

Vodice injekcione jedinice

Standardna konstrukcija mašina je takva da se jedinica za ubrizgavanje nalazi sa desne strane nepokretne ploče. Vodice injekcione jedinice obično su saosne sa osom cilindra. Vodice mogu biti izgrađene kao samostalni stubovi ili u kombinaciji sa klipom odnosno cilindrom. Jedna od varijanti vođenja injekcione jedinice data je na slici 7.10



Slika 2.18 Vođenje injekcione jedinice [4]

Pogonski sistem za obrtanje puža

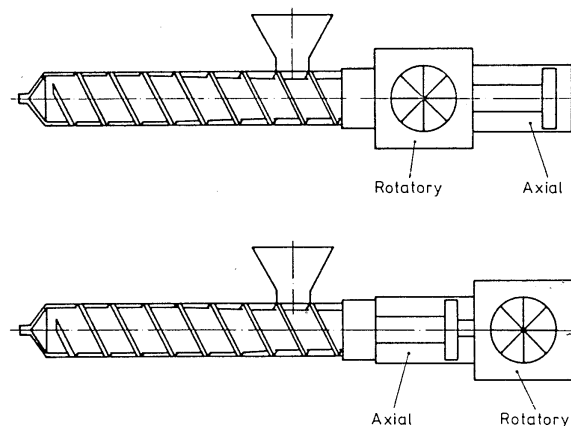
Kod obrade termoplasta 60% energije potrebne za plastifikaciju (a 90% kod termoseta) dobija se trenjem usled obrtanja puža. Zbog toga je prisutna značajna potrošnja energije u fazi punjenja cilindra, pa pogonski sistem mora biti na adekvatan način dimenzionisan i mora raspolagati odgovarajućim obrtnim momentom.

Rotacioni pogonski sistem puža karakteriše se načinom i pozicijom pogona i može biti:

- *elektromotorni sa reduktorom (puž ili zupčanici)*
- *hidromotorni sa reduktorom*
- *direktan hidropogon*

U pogledu lokacije pogona moguće su dve varijante (slika 2.19.)

- *lokacija između puža i hidrocilindra*
- *iza hidrocilindra*



Slika 2.19 Lokacija pogona rotacionog i aksijalnog pogona puža [4]

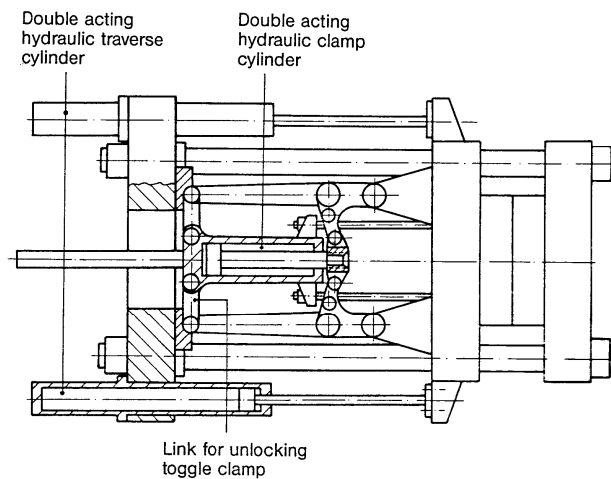
Jedinica za zatvaranje kalupa

Zadatak jedinice za zatvaranje kalupa je dovođenje u dodir pokretnog i nepokretnog dela kalupa (zatvaranje kalupa), održavanje u dodiru delova kalupa tokom ubrizgavanja i delovanja naknadnog pritiska i otvaranje kalupa radi vađenja otpreska iz kalupne šupljine.

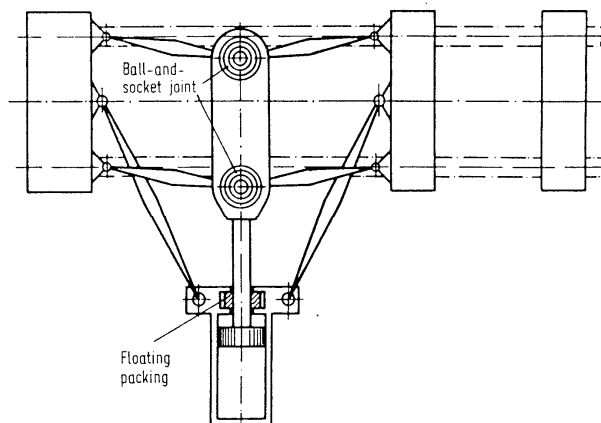
Varijante sistema za zatvaranje kalupa su:

1. mehanički sistem,
2. hidraulični sistem,
3. mehaničko-hidraulični sistem.

Mehanički sistem zatvaranja je superioran u pogledu brzine u odnosu na hidraulični. Hidraulični sistem ima veće mogućnosti regulacije hoda i smanjene elastične deformacije. Generalno, ne može se dati prednost ni jednom od sistema za zatvaranje.



Slika 2.20 Hidraulični sistem za zatvaranje kalupa: 1 - hidraulični cilindar 3-vođice 4 - pokretna ploča 5 - pokretni kalup 6 - nepokretni kalup 7 - nepokretna traverza [4]



Slika 2.21 Dvopolužni mehanički sistem za zatvaranje sa bočnim hidrauličnim cilindrom za aktiviranje [4]

Jedinica za temperiranje [1]

Održavanje pravilnog toplotnog režima linije za injekcijsko presovanje plastomera zahteva postizanje potrebnog temperaturnog polja u kalupu i propisane temperature ulja injekcione jedinice, što se ostvaruje “temperiranjem”. Postignute temperature potrebno je precizno održavati, što se ostvaruje odgovarajućim regulacionim krugovima.

Od temperaturnog polja u kalupu, koje se karakteriše temperaturom površine kalupne šupljine, direktno zavisi vreme hlađenja otpreska, a time i kvalitet otpreska.

Propisanu temperaturu površine kalupne šupljine moguće je postići: vodom iz vodovodne mreže (sa ili bez dodataka), posebnim uređajem kojim u zatvorenom krugu kruži medijum za temperiranje, i impulsnim temperiranjem [cevnim grejačima i vodom iz vodovodne mreže (postupak Wilden)] itd.

Temperiranje vodom iz vodovodne mreže je najjednostavnije, još se najčešće primjenjuje, a moguće je samo kada se iz kalupa odvodi toplota. Međutim, ima vrlo krupnih nedostataka: nepovratno se troši, sve skuplja voda, u procesu se bitno menjaju uslovi promenom godišnjeg doba, pa i tokom radnog dana, jer ulazna temperatura vode zimi ili ujutro može biti nekoliko stepeni niža od one leti ili poslepodne. Dolazi do taloženja kamenca u kanalima, što bitno pogoršava razmenu toplote, itd.

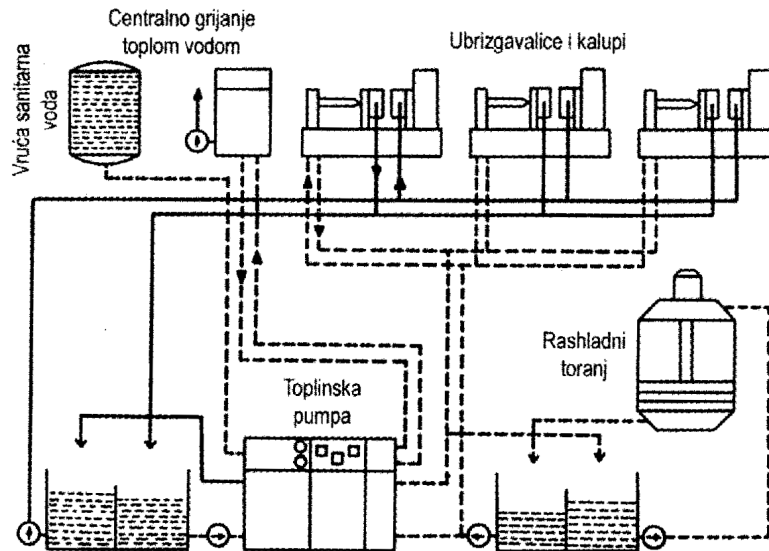
Zbog toga su razvijeni posebni uređaji za temperiranje o kojima ovde neće biti reči jer svojom kompleksnošću zahtevaju suviše detaljnu analizu.

Još bi trebalo napomenuti da se ne temperira samo kalup na mašini već i sama jedinica za ubrizgavanje i sistem za zatvaranje alata.

To se radi zbog toga što temperatura ulja u hidrauličnom sistemu bitno utiče na viskoznost ulja, a time i na kvalitet otpreska. Stoga se danas temperiranju ulja injekcione jedinice posvećuje velika pažnja. Temperiranje ulja se može vršiti posebnim uređajima za temperiranje ili na osnovu drugih rešenja koja ugrađuje proizvođač mašine.

Posebno važan problem kod mašina za injekciono presovanje je održavanje temperature hidrauličnog ulja, koja standardno treba da se nalazi na nivou od 50⁰C. Ovaj problem se rešava posebnim uređajem za temperiranje ulja ili pomoću već ugrađenog uređaja u mašinu.

Održavanje potrebne temperature u pogonu (grejanje i hlađenje) može biti povezano sa temperiranjem sistema za injekciono presovanje, čime se štedi energija i porošnja vode. Temperiranje pogona (grejanje odnosno hlađenje) može se vršiti pogonskom toplotom iz mašine, tj. kalupa i uređaja za temperiranje ulja uz dodatak toplotne pumpe koja omogućuje zagrevanje odnosno hlađenje pogona. Na slici 2.22 prikazan je sistem za temperiranje mašine i pogona za injekciono presovanje.



Slika 2.22 Sistem za temperiranje pogona i mašine za injeksiono presovanje [1]

Sistem upravljanja

Sistem upravljanja mašine za injeksiono presovanje obuhvata (sadrži) sve uređaje koji kontrolišu temperaturu cilindra po zonama, temperaturu kalupa, silu zatvaranja, temperaturu, pritisak i protok ulja kao i redosled izvođenja faza pri injeksionom presovanju.

Kvalitet otpreska kod injeksionog presovanja određen je sa dva osnovna parametra procesa: pritisak i temperatura ubrizgavanja, dok brzina ubrizgavanja ima limitiran uticaj. Sistem upravljanja mora da obezbedi logičan redosled u izvođenju pojedinih sekvenci u procesu oblikovanja, kao što je zatvaranje i otvaranje kalupa, približavanje injeksione jedinice, otvaranje i zatvaranje mlaznice i pokretanje klipa i dr.

Svi relevantni parametri procesa se zapisuju i memorišu, kako bi praćenje kvaliteta otpreska u funkciji istih bilo efikasnije i lakše te kako bi se po potrebi mogla vršiti korekcija.

Sistem upravljanja ima ulogu nadzora (kontole) procesa sa zadatkom dobijanja kvalitetnog obratka.

Elementi koji služe za upravljanje parametrima procesa imaju svoje upravljačke jedinice.

Tehničke karakteristike mašina za injeksiono prsovanje

Tehnologija injeksionog presovanja primenjuje se u vrlo širokom dijapazonu dimenzija, tj. mase ili zapremine obratka. Delovi ručnog sata su primer sitnih delova koji se dobijaju ovom tehnologijom. Pojedini zupčanici su toliko mali da se u jedan naprstak može spakovati i 10.000 komada. Na suprot tome, ovom tehnologijom se izrađuju delovi površine veće od 3,5m² i mase do 180 kg.

Tabela 2 Tehničke karakteristike mašina za injekciono presovanje

<i>Veličina</i>	<i>Jedinica</i>
<i>Sila zatvaranja</i>	<i>kN</i>
<i>Hod otvaranja</i>	<i>mm</i>
<i>Dimenzije ploča za alat</i>	<i>mm</i>
<i>Rastojanje između stubova</i>	<i>mm</i>
<i>Instalisana ukupna snaga motora</i>	<i>kW</i>
<i>Snaga motora za pogon hidraulike</i>	<i>kW</i>
<i>Prečnik puža</i>	<i>Mm</i>
<i>Relativna dužina puža L/D</i>	-
<i>Kapacitet ubrizgavanja</i>	<i>cm³</i>
<i>Kapacitet plastifikacije materijala</i>	<i>Kg/h</i>
<i>Maksimalni pritisak ubrizgavanja</i>	<i>bar</i>
<i>Maksimalni protok ubrizgavanja</i>	<i>Cm³/s</i>
<i>Obrtni moment puža</i>	<i>Nm</i>
<i>Gabariti mašine AxBxC</i>	<i>M</i>
<i>Masa mašine</i>	

Mašine koje se koriste za injekciono presovanje ne mogu da pokriju kompletan asortiman sa jednom injekcionom jedinicom. Tako na primer za elektro-komponente mase od 1-10g primenjuju se standardne mašine, dok se za delove satova o kojima je gore bilo reči koristi druga oprema.

Mašine sa pužem Ø15 koriste se za delove od 4-12g; sila zatvaranja je od 100-250 kN. Postoje mašine sa silom zatvaranja od 100.000 kN na kojima je moguća izrada delova mase od 70 kg. Ovakve mašine teško bi se mogle nazivati standardnim. Mašine standardne namene imaju kapacitet presovanja od 1g do 25kg, a silu zatvaranja do 50.000 kN. Mašine većih dimenzija su nestandardne.

Osnovni tehnički podaci mašina za injekciono presovanje su zapreminski kapacitet i sila zatvaranja. Ove karakteristike proizilaze iz niza pojedinačnih osobina mašine. U tabeli 2 date su tehničke karakteristike mašina za injekciono presovanje prema EUROMAP normama.



Slika 2.23 Mašina za injekciono presovanje Engel, Austrija

3. TOPLOTNI PROCESI PRI INJEKCIONOM PRESOVANJU

Svi procesi prerade polimera pa i injekciono presovanje zasnivaju se na procesima **zagrevanja i hlađenja** polimernog materijala.

Toplotni proračuni kod injekcionog presovanja bazirani su na zakonu o očuvanju energije tj. I zakonu termodinamike.

Proračun treba da rezultira:

- *proračunom temperature u funkciji vremena oblikovanja i*
- *rasporedom temperatura unutar sistema za injekciono presovanje*
- *razmenom topline u kalupu za injekciono presovanje i*
- *parametrima sistema za temperiranje*

Procesi razmene toplote kod prerade polimera zavise od termičkih svojstava materijala u pojedinim agregatnim stanjima (čvrsto, staklasto i tečno). Toplotna svojstva polimera zavise od **temperature, pritiska i sastava polimernog materijala** (udela pojedinih komponenti).

3.1 TOPLOTNA SVOJSTVA POLIMERA

Za preradu plastomera posebnu važnost imaju tri termodinamičke veličine: **temperatura, pritisak i specifična zapremina materijala**. Njihova međusobna zavisnost definisana je **PVT dijagramom**.

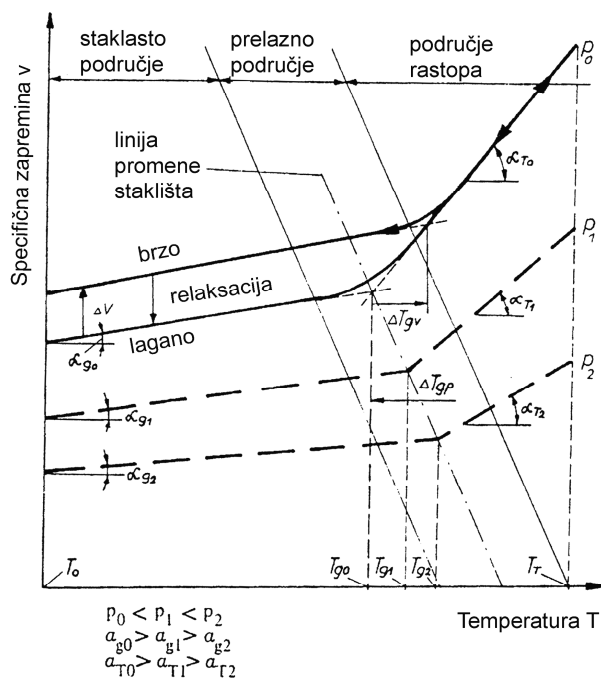
Specifična zapremina je recipročna vrednost gustine materijala:

$$v = \frac{1}{\rho} = f(T, P)$$

PVT dijagram - predstavlja osnovu za određivanje skupljanja otpreska tokom injekcionog presovanja, odnosno osnovu za vođenje procesa injekcionog oblikovanja. Na izgled dijagrama osim osnovnog sastava utiče i takozvana „*proizvodna prošlost*“ materijala. Uopštena oznaka materijala, kao na primer LDPE ne podrazumeva automatsko poznavanje PVT dijagrama, iako takvih podataka ima u literaturi, zbog toga što snažan uticaj na ovaj dijagram imaju toplotno-reološka zbivanja u samom radnom cilindru mašine, malznici i ulivnom sistemu. Ovi dijagrami se određuju isključivo eksperimentalno. PVT dijagrami su različiti za amorfne i kristalaste termoplaste.

a) amorfni polimer

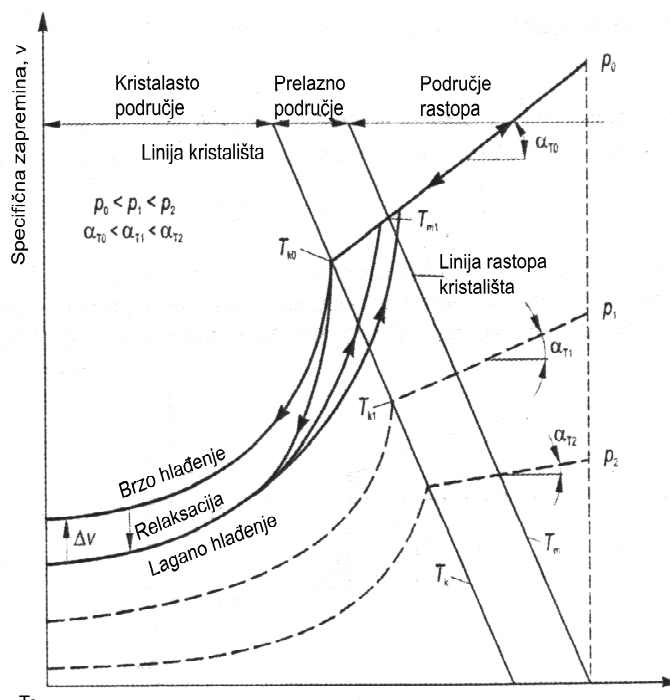
Osnovnu zavisnost u PVT dijagramu predstavlja promena specifične zapremine sa temperaturom, pri konstantnom pritisku. Porastom temperature povećava se specifična zapremina plastomera (odnosno opada gustina). Do tačke **T_g** (staklište) ova promena je praktično pravolinijska a u tom području materijal je u čvrsto stanju. Iza tačke T_g materijal omekšava a potom prelazi u rastopljeno stanje (tačka **T_t** u dijagramu). Povećanjem pritiska odnos između specifične zapremine i temperature je sličan prethodnoj promeni uz određena pomeranja karakterističnih tačaka u dijagramu. Na karakter promene $V=f(T)$ utiče i brzina hlađenja. Sporo hlađenje omogućuje relaksaciju materijala i niže vrednosti specifične zapremine i obrnuto. Smanjenje specifične zapremine porastom pritiska objašnjava se smanjenjem međumolekularnih praznina u materijalu. Iz dijagrama slika 3.1 vidi se da porastom pritiska dolazi do pomeranja specifičnih prelaznih tačaka (T_g i T_t).



Slika 3.1. PVT dijagram amornog termoplasta:
 T_0 -temperatura okoline, T_g -staklište, T_t -temperatura rastopa, ΔT_{gp} -promena T_g usled povišenja pritiska, ΔT_{gv} -promena usled brzine hlađenja

b) Kristalasti polimer

Kristalasti plastomeri sadrže kristalna i amorfna područja pa se zbog toga PVT dijagram razlikuje u odnosu na dijagram amornog plastomera (slika 3.2).



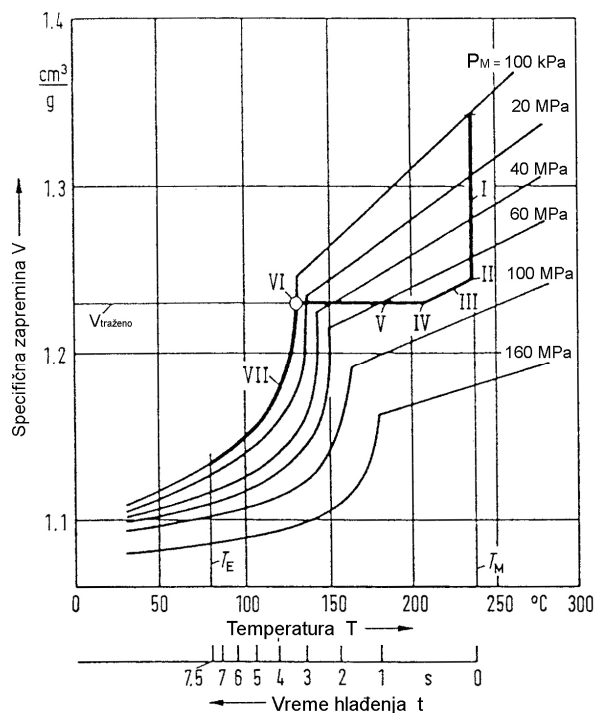
Slika 3.2 PVT dijagram kristalastog termoplasta: T_0 -temperatura okoline, T_k -kristalište, T_m -prelaz u amorfno stanje, T_t -temperatura rastopa

Promena specifične zapremien u području rastopa kod kristalastih plastomera je idntična promeni kod amorfnih plastomera. U početnoj fazi hlađenja (pri atmosferskom pritisku P_0) promena specifične zapremine je linearna sa temperaturom sve do tačke T_k , koja definiše početak kristalizacije polimera, kada zbog mehanizma kristalizacije dolazi do naglog pada specifične zapremine. Povećanjem pritiska zadržava se osnovna zakonitost između specifične zapremine i temperature, ali uz promenu nagiba u području rastopa i pomeranje temperature kristalizacije ka višim vrednostima.

Pri zagrevanju kristalastog plastomera prelaz iz kristalnog u amorfno stanje određen je temperaturom T_m . Temperaturni interval između temperature kristalizacije i T_k i topljenja T_m iznosi: 50 stepeni za PP, 34 POM, i 17 stepeni za PE.

Povećanjem brzine hlađenja pogoršavaju se uslovi kristalizacije i kristalište se pomera ka nižim temperaturama, što ometa kristalizaciju (smanjuje udeo kristalne faze) i povećava specifičnu zapreminu. Pri izuzetno brzom hlađenju stvara se veliki broj kristalizacionih klica, što za posledicu ima sitnozrnu strukturu otpreska.

PVT dijagrami amorfnog i kristalastog plastomera imaju veliki prektični značaj za proces injekcionog presovanja. Ovi dijagrami služe kao osnova za projektovanje radnog ciklusa i pojedinih faza oblikovanja a posebno su važni za definisanje faze delovanja naknadnog pritiska.



Slika 3.3. Postupak injekcionog presovanja u P-V-T dijagramu

P_M : Pritisak rastopa, T_E : Temperatura izbacivanja, T_M : Temperatura rastopa

- I. injekciono presovanje sa $T=\text{const.}$,
- II. svičovanje pritiska na iznos naknadnog pritiska,
- III. izobarni proces $p=\text{const.}$,
- IV. početak faze izohornog presovanja – ova faza je odlučujuća za kvalitet otpreska,
- V. izohora $V=\text{const.}$, uz pad pritiska,
- VI. tačka dostizanja pritiska okoline (100Kpa). Ova faza nema uticaja na kvalitet obratka, osim što je primetno skupljanje usled pada temperature.

3.2 KALOMETRIJKA SVOJSTVA PLASTOMERA

Specifična toplota je količina toplote koju treba dovesti jednom kilogramu plastomera pri izobarnom zagrevanju i porastu temperature za jedan stepen K:

$$C_p = \frac{dQ}{m \cdot dT} \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

Q – količina toplote

T – temperatura

M – masa

Ova veličina menja se sa temperaturom i zavisi od vrste termplasta i njihove strukture - kristalni amorfni.

Toplotna provodljivost je veličina koja pokazuje koju količinu toplote je moguće provesti kroz presek nekog materijala pri zadatom temperaturnom padu u određenom vremenu:

$$\lambda [W / m \cdot K]$$

Ova veličina takođe zavisi od vrste i strukture polimera i trenutne temperature.

Entalpija - predstavlja sadržaj toplote po jedinici mase $h [KJ / kg]$

$h = u + p \cdot v$, u - unutrašnja energija, p-spoljašnji pritisak, v-specifična zapremina jedinice mase.

Temperaturna provodljivost izražava brzinu promene temperature tela usled širenja toplote:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \left[\frac{cm^2}{s} \right]$$

Toplotna prodornost je mera brzine prodiranja toplote u telo ili sposobnost akumulacije toplote, a definiše se koeficijentom akumulacije toplote:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \left[Ws^{\frac{1}{2}} / m^2 K \right]$$

C - specifični toplotni kapacitet

I ovaj koeficijent (b) zavisi od vrste plastomera i trenutne temperature.

Dodirna temperatura između dva tela (A i B) sa različitim temperaturama T_A i T_B i

toplotnim prodornostima (b_A i b_B), određena je uzrazom: $T_D = \frac{b_A \cdot T_A + b_B \cdot T_B}{b_A + b_B}$

3.3 TOPLOTNI BILANS PRI PRERADI TERMOPLASTA

Kod injekcionog presovanja glavni termodinamički proces se odnosi na **razmenu toplote u kalupu**. Kvalitet proizvoda u najvećoj meri zavisi od procesa **zagrevanja i hlađenja** polimera. Osnovni ciljevi pri preradi su: homogeno zagrevanje plastomera i odgovarajuće hlađenje.

Toplotni bilans pri injekcionom presovanju mora uzeti u obzir da je polimeru potrebno dovesti određenu količinu toplote (direktno od grejača) i određenu količinu toplote dobiti pretvaranjem mehaničkog rada sve sa ciljem da se polimer zagreje na potrebnu temperaturu, koja mu omogućuje optimalno oblikovanje, i da se pokriju energetske gubici razmene sa okolinom i gubici deformacionog rada.

Dovođenje toplote vrši se:

- a) *provođenjem*
- b) *konvekcijom-prenošenjem*
- c) *zračenjem*
- d) *pretvaranjem mehaničkog rada u toplotu* - Ova komponenta je vrlo bitna jer se smicanje i trenje odvija unutar materijala što dovodi do homogenizacije temperature u polimeru. Pri tome važnu ulogu igra puž i cilindar.

Jedan deo energije dobija se **kompresijom** polimera. Udeo energije od mehaničkog rada, znatno je veći od energije dobijene zagrevanjem spoljnjim grejačima. Porastom broja obrtaja puža direktno se povećava ovaj udeo toplote.

Gubici energije:

- a) *gubici usled hlađenja rashladnim medijumom*
- b) *gubici provođenjem toplote*
- c) *gubici konvekcijom*
- d) *gubici zračenjem*

Energetski bilans:

$$\Phi_T + W_M \cong q_v \cdot \rho \int_{T_0}^T C(T) \cdot dT + W_D \pm \Phi_o \quad (3.1)$$

Φ_T – ukupna dovedena toplota u jedinici vremena

W_M – energija mehaničkog rada u jedinici vremena

$q_v = \frac{dV}{dt}$ – zapreminski protok

$q_v = n \cdot V_c$ n- broj ciklusa, V_c - zapremina polimera u jednom ciklusu

ρ – gustina polimera

c – specifični toplotni kapacitet

W_D – deformacioni rad u jedinici vremena

Φ_o – toplota razmenjena sa okolinom u jedinici vremena, znak (-) ako se toplota predaje (+) ako se uzima toplota iz okoline

U gornjoj jednačini član pod integralom **predstavlja promenu entalpije polimera I** izračunava se približno:

$$\Delta H = H_T - H_{TO} = \int_{TO}^T C_p(T) \cdot dT$$

(3.2)

4. TERMODINAMIČKI PROCESI KOD INJEKCIONOG PRESOVANJA

Termodinamički posmatrano kod injekcionog presovanja odvijaju se dva procesa: **zagrevanje polimera** na određenu temperaturu a potom **hlađenje** na temperaturu koja obezbeđuje dovoljnu čvrstoću da se obradak može izbaciti iz kalupa. Pri tome se kalup mora održavati na propisanoj temperaturi.

ZAGREVANJE TERMOPLASTA

Termoplast se može zagrevati na dva načina:

- a) predgrevanjem van cilindra
- b) zagrevanjem u cilindru

Potrebna količina toplote zavisi od temperature prerade polimera.

U cilindru se *toplota dovodi konvekcijom od grejača i pretvaranjem mehaničkog rada u toplotu.*

Predgrevanje polimera izvodi se, npr, onda kada je potrebno izvršiti sušenje materijala radi oslobađanja od vlage (npr. kod polikarbonata je dozvoljena vlaga manja od 0,02%). Sušenje se izvodi pomoću zagrejanog vazduha na temperaturi od 393K (120°C), pa je takvom materijalu potrebno dovesti manje toplote u cilindaru.

HLAĐENJE OTPRESKA

Kvalitet otpreska i ekonomičnost proizvodnje veoma zavisi od dužine vremena potrebnog za hlađenje. Vreme hlađenja je najduža vremenska faza u ciklusu injekcionog presovanja.

Na vreme hlađenja otpreska utiče:

- a) *debljina otpreska*
- b) *toplotna svojstva polimera*
- c) *uslovi prerade- temperatura rastopa i temperatura kalupa*

Hlađenje polimera počinje odmah po naslanjanju mlaznice tj. ulaskom materijala u ulivni sistem čije površine su hladne. Istovremeno zbog trenja rastopljeni materijal se zagreva. Procesi zagrevanja i hlađenja pri injekcionom presovanju su veoma složeni i međusobno se prekrivaju. *Promena temperature rastopa znatno manje utiče na vreme hlađenja od temperature kalupne šupljine. Poseban problem je u tome što temperatura u kalupu nije jedinstvena već se radi o temperaturnom polju koje se menja sa vremenom.*

Toplotna ravnoteža postiže se tek kada obradni sistem radi određeno vreme. Održavanje temperature u kalupu izvodi se pomoću uređaja za temperiranje.

5. VREME HLAĐENJA PLASTIČNIH OBRADAKA

5.1 Struktura vremena hlađenja

Prema DIN 24450 vreme hlađenja otpreska definiše se kao vreme koje započinje naredbom "ubrizgavanje", a završava naredbom "otvaranje kalupa".

U tom vremenskom periodu odigravaju se sledeće faze:

1. ubrizgavanje (t_u)
2. delovanje naknadnog pritiska (t_{np})
3. plastifikacija polimera (t_{ps})
4. vraćanje mlaznice u početni položaj (t_{mr})
5. dodatno hlađenje (t_d)

Vreme hlađenja prema tome je:

$$t_h = t_u + t_{np} + t_{ps} + t_{mr} + t_d$$

5.2 Proračun pojedinih komponenti vremena

Vreme ubrizgavanja je ukupno potrebno vreme da se kalupna šupljina ispuni rastopljenim polimerom, plus vreme sabijanja i vreme održavanja maksimalnog pritiska. Ova faza je relativno kratka i **može se odrediti na osnovu zapremine otpresaka i brzine ubrizgavanja.**

Vreme delovanja naknadnog pritiska je ustvari jednako vremenu hlađenja ulaznih kanala obradka. Metodologija određivanja dužine ove faze je ista kao i za vreme hlađenja, s tom razlikom što se oblik ušća i njegove dimenzije razlikuju u odnosu na iste kod obradka.

Vreme plastifikacije kod pužnog uređaja za ubrizgavanje određuje se prema izrazu:

$$t_{ps} = \frac{m_g}{q_p}$$

m_g - masa grozda, tj. masa svih otpresaka + ulivni sistem

q_p - kapacitet plastifikacije mašine, koji predstavlja količinu mase koja se nakupi u sabirnici u toku jednog ciklusa

Vreme vraćanja mlaznice - određeno je tehničkim karakteristikama uređaja (mašine za injekciono presovnje).

Dopunsko vreme hlađenja - dopunjava ukupno vreme potrebno za hlađenje otpreska:

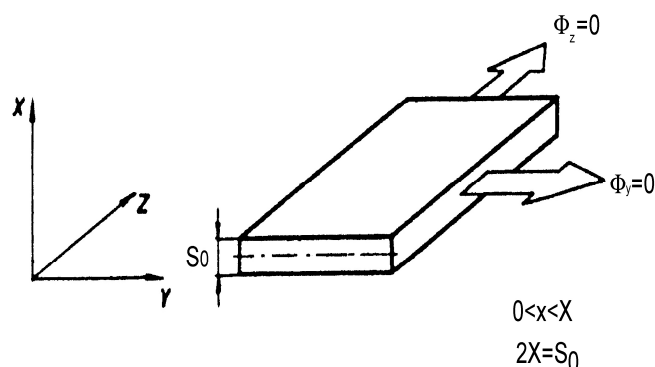
$$t_d = t_h - (t_u + t_{np} + t_{ps} + t_{mr})$$

Po pravilu $t_d > 0$. Prema nekim istraživanjima to vreme je od **45÷67 % od tehnološkog vremena**, i nepotrebno je da bude tako dugo. Ovo vreme može se skratiti pravilnom konstrukcijom otpreska, sniženjem temperature prerade i posebno pravilnim određivanjem ukupnog vremena hlađenja.

Proračun vremena hlađenja baziran je na opštim principima termodinamike, uz određena pojednostavljenja i prilagođavanja koja proizilaze iz specifičnosti procesa injekcionog presovanja. Osnovni proračuni izvedeni su za pločasto telo.

5.3 ODREĐIVANJE VREMENA HLAĐENJA PLOČASTIH TELA - OTPRESAKA

Teorijsko rešenje vremena hlađenja postoji za model prikazan na slici, koji predstavlja pločasti otpresak (toplotni izvor) čije se dimenzije u pravcima z i y beskrajne, a debljina joj je $2X=S_0$.



Slika 5.1 Dimenzije pločastog otpreska

Predpostavlja se da razmena toplote u pravcima y i z ne postoji ($\Phi_z = \Phi_y = 0$), a toplota se sa pločastog otpreska prenosi preko zidova kalupa u pravcu ose X. Vrednost toplotnog prenosa je ista na obe površine. Polazna jednačina (Furijerova jednačina) prilagođena na uslove hlađenja polimernog otpreska, uz određena pojednostavljenja ima oblik:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Rešenje gornje jednačine ima oblik:

$$T(x, t) = T_k + 2(T_T - T_K) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_k}{\delta_k + \sin \delta_k \cdot \cos \delta_k} \cdot e^{-\delta_k^2 \frac{at}{X^2}} \cdot \cos\left(\delta_k \frac{x}{X}\right) \quad (5.1)$$

Tabela 5.1

k	1	2	3
δ_k	$\pi / 2$	$3\pi / 2$	$5\pi / 2$

T_T - temperatura rastopa;

T_K - temperatura kalupa

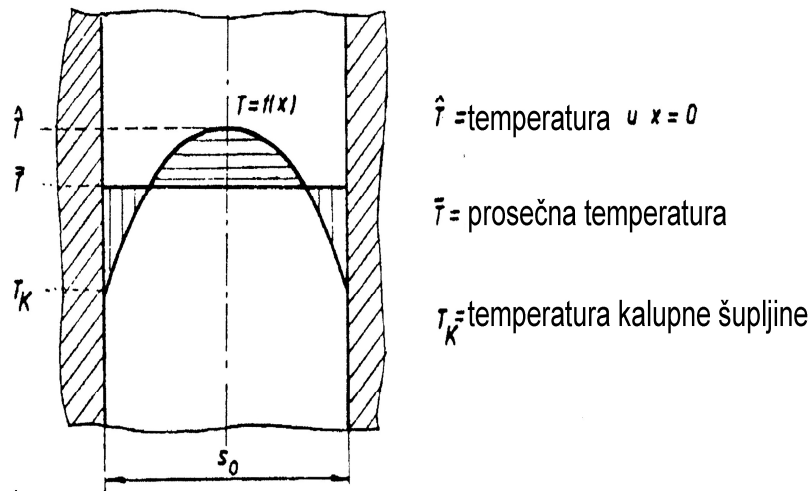
δ_k -koeficijent

a- koeficijent temperaturne provodljivosti $[m^2 / s \cdot K]$

$$X = \frac{S_0}{2}$$

Temperaturni profil nakon ubrizgavanja rastopa u kalup prikazan je na slici 5.2 .

$$y = f(x)$$



Slika 5.2 Temperaturni profil u kalupnoj šupljini

Rešenje jednačine (2) postoji za dva slučaja:

1. Vreme hlađenja s obzirom na temperaturu u središtu otpreska (\hat{T}):

$$\hat{t}_h = \frac{S_0^2}{a_{ef} \cdot \pi^2} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{T_T - T_K}{\hat{T}_{P0} - T_K} \right) \quad (5.2)$$

$\hat{T}_{P0} = \hat{T}$ - temperatura u središtu ploče tj. temperatura postojanosti oblika

T_K - temperatura kalupa

\bar{T} - srednja temperatura otpreska

a_{ef} - efektivna temperaturna provodljivost

2. Prosečno vreme hlađenja pločastog obradka

Ako se u jednačini (2) uzme samo prvi član sume ($k=1$) $\delta_K = \pi/2$ dobija se prosečno vreme hlađenja pločastog otpreska:

$$\bar{t}_h = \frac{S_0^2}{a_{ef} \cdot \pi^2} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_T - T_K}{\bar{T}_{P0} - T_K} \right) \quad (5.3)$$

gde je:

\bar{T}_{P0} - srednja temperatura pločastog otpreska

$$a_{ef} = \frac{F_{0h} \cdot S_0^2}{t_h} - \text{efektivna temperaturna provodljivost}$$

U gornjoj jednačini S_0 je ekvivalentna debljina otpreska koja se određuje na osnovu zapremine i površine polovine otpreska:

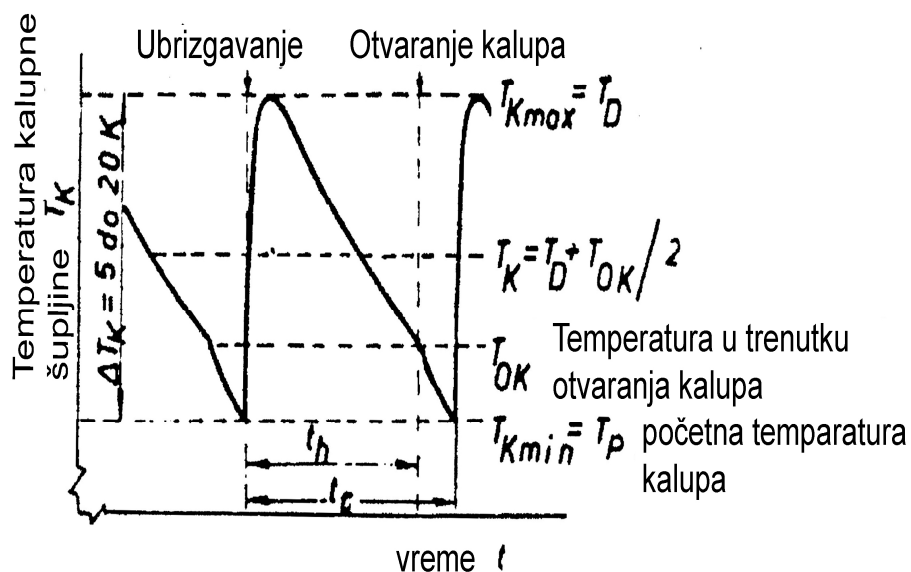
$$S_0 = V_0 / A_{oi}$$

Vrednosti koeficijenta efektivne temperaturne provodljivosti (a_{ef}) date su u tabeli 5.2

Tab 5.2 Efektivna toplotna provodljivost

$a_{ef} = a_1 T_K + b_1$ (5.38)		
Plastomer	Koeficijenti	
	$\frac{a_1}{10^8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}}$	$\frac{b_1}{10^8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}}$
ABS	0,0042	6,9052
LDPE	-0,0417	21,4513
HDPE	-0,0634	28,0252
PA 6,6	-0,0050	10,3650
PC	0,0045	9,3789
PMMA	-0,0160	12,5102
POM	-0,0382	19,1988
PP	-0,0106	9,8494
PS	-0,0193	14,3579
PVC	0,0066	5,1172
SAN	-0,0015	9,0069

Na slici 5.3 prikazan je tok promene temperature u šupljini kalupa.



Slika 5.3 Promena temperature kalupa tokom vremena

Dodirna temperatura kalupa, tj temperatura na kontaktu otpreska i kalupne šupljine ($T_{Kmax}=T_D$), može se određivati prema poznatom izrazu:

$$T_{k\max} = T_D = \frac{T_P \cdot b_K + T_T \cdot b_P}{b_K + b_P} \quad (5.4)$$

b_K - toplotna prodornost kalupa

b_P - toplotna prodornost polimera

$T_P = T_{kmin}$ – početna temperatura kalupa

Srednja temperatura kalupne šupljine:

$$T_K = \frac{T_D + T_{0K}}{2} \quad (5.5)$$

T_{0K} – temperatura u trenutku otvaranja kalupa

Srednja temperatura kalupa se može odrediti i kao:

$$T_K = \frac{T_D + T_P}{2} \quad (5.6)$$

5.4 Vreme hlađenja različitih otpresaka

U tabeli 5.3 dati su izrazi za određivanje vremena potrebnog za hlađenje središta tela i za slučaj kad se vreme hlađenja određuje prema srednjoj temperaturi tela.

Tabela 5.3 Vreme hlađenja različitih otpresaka

OBLIK		JEDNAČINA	
CILINDAR	mera d_o	$\hat{t}_h = \frac{d_o^2}{a_{cf} \cdot 23,132} \ln(1,599 \cdot T)$	(5.46)/13,15/
	dužina ∞	$\bar{t}_h = \frac{d_o^2}{a_{cf} \cdot 23,132} \ln(0,975 \cdot T)$	(5.47)/15/
CILINDAR	mera d_o	$\hat{t}_h = \frac{1}{\left(\frac{23,14}{d_o^2} + \frac{\pi^2}{l_o^2}\right) a_{cf}} \ln\left(\frac{6,396}{\pi} \cdot T\right)$	(5.48)/13/
	dužina l_o	$\bar{t}_h = \frac{1}{\left(\frac{23,14}{d_o^2} + \frac{\pi^2}{l_o^2}\right) a_{cf}} \ln\left(\frac{7,802}{\pi^2} \cdot T\right)$	(5.49)/17,23/
KVADAR	širina b_o	$\hat{t}_h = \frac{b_o^2}{\left(1 + \frac{b_o^2}{h_o^2}\right) \cdot \pi^2 \cdot a_{cf}} \ln\left(\frac{16}{\pi^2} \cdot T\right)$	(5.50)/13/
	visina h_o	$\bar{t}_h = \frac{b_o^2}{\left(1 + \frac{b_o^2}{h_o^2}\right) \cdot \pi^2 \cdot a_{cf}} \ln\left(\frac{64}{\pi^4} \cdot T\right)$	(5.51)/17,23/
KUGLA	mera d_o	$\hat{t}_h = \frac{d_o^2}{4 \cdot a_{cf} \cdot \pi^2} \ln(2 \cdot T)$	(5.52)/13/
		$\bar{t}_h = \frac{d_o^2}{4 \cdot a_{cf} \cdot \pi^2} \ln(1,178 \cdot T)$	(5.53)/17,23/
KVADAR	širina b_o	$\hat{t}_h = \frac{1}{\left(\frac{1}{b_o^2} + \frac{1}{h_o^2} + \frac{1}{l_o^2}\right) \pi^2 \cdot a_{cf}} \ln\left(\frac{64}{\pi^3} \cdot T\right)$	(5.54)/13/
	visina h_o	$\bar{t}_h = \frac{1}{\left(\frac{1}{b_o^2} + \frac{1}{h_o^2} + \frac{1}{l_o^2}\right) \pi^2 \cdot a_{cf}} \ln\left(\frac{512}{\pi^6} \cdot T\right)$	(5.55)/17,23/
KOCKA	visina h_o	$\hat{t}_h = \frac{h_o^2}{3 \cdot a_{cf} \cdot \pi^2} \ln\left(\frac{64}{\pi^3} \cdot T\right)$	(5.56)/13/
		$\bar{t}_h = \frac{h_o^2}{3 \cdot a_{cf} \cdot \pi^2} \ln\left(\frac{512}{\pi^6} \cdot T\right)$	(5.57)/17,23/

Napomena: $T = \frac{T_T - T_K}{T_{PO} - T_K}$

5.5 Opšta jednačina hlađenja otpresaka

Na osnovu prethodnih rešenja jednačina (5.2) i (5.3) dolazi se do opšteg oblika jednačine hlađenja polimernih otpresaka:

$$t_h = \frac{b_0^2}{K_0 \cdot \pi^2 \cdot a_{ef}} \cdot \ln \left(K_u \cdot \frac{T_T - T_K}{T_u - T_K} \right) \quad (5.7)$$

b_0 – karakteristična dimenzija

$K_0 = (1 + a_{10}^2 + a_{20}^2)$ – koeficijent oblika

T_T – temperatura rastopa

T_K – temperatura kalupne šupljine

T_u – srednja (unutrašnja) temperatura otpreska

$T_u = T_{p0}$, T_{p0} – temperatura postojanosti oblika

$K_u = K_{u1}$ za \hat{t}_h , odnosno $K_u = K_{u2}$ za \bar{t}_h

K_u – koeficijent unutrašnjosti obradka

Tabela 5.4 Koeficijenti oblika i unutrašnjosti za različite forme otpreska

Oblik otpreska			\hat{t}_h	\bar{t}_h
	a_{10}	a_{20}	K_{U1}	K_{U2}
Ploča $s_0 = b_0$	0	0	$4/\pi$	$8/\pi^2$
Cilindar $d_0 = b_0$ $l_0 = \infty$	0	1,15921	1,599	0,975
Cilindar $d_0 = b_0$ l_0	1,15956	d_0/l_0	$6,396/\pi$	$7,802/\pi^2$
Kugla $d_0 = b_0$	1	$\sqrt{2}$	2	1,178
Kvadar b_0, h_0, l_0 $l_0 \text{ i } h_0 > b_0$	b_0/h_0	b_0/l_0	$64/\pi^3$	$512/\pi^6$
Kvadar b_0, h $l = \infty$	b_0/h_0	0	$16/\pi^2$	$64/\pi^4$
Kocka b_0	1	1	$64/\pi^3$	$512/\pi^6$

$T_u = T_{P0}$ – temperatura postojanosti oblika koja se određuje prema sledećim izrazima:

5.6 Određivanje prosečne temperature otpreska i temperature u sredini otpreska

1. *Prosečna temperatura otpreska* \bar{T}_{P0} uz poznatu temperaturu središta T_{P0} glasi:

$$\bar{T}_{P0} = (\hat{T}_{P0} - T_K) \cdot K + T_K \quad (5.8)$$

2. *Temperatura u sredini obratka* \hat{T}_{P0} ako je poznata početna temperatura otpreska \bar{T}_{P0} :

$$\hat{T}_{P0} = (\bar{T}_{P0} - T_K) \cdot \frac{1}{K} + T_K \quad (5.9)$$

Tabela 5.5 Koeficijent K za izračunavanje temperatura otpreska

oznaka	Oblik otpreska	K
a	ploča	$2 / \pi$
b	cilindar beskonačne dužine	0,61
c	cilindar konačne dužine.....	$1,219 / \pi$
d	kugla	0,589
e	kvadar beskonačne dužine	$4 / \pi^2$
f	kvadar konačne dužine	$8 / \pi^3$
g	kocka	$8 / \pi^3$

5.6 Analiza ciklusa injekcionog presovanja

S obzirom da je vreme hlađenja moguće precizno proračunati primenom odgovarajućih izraza zavisno od oblika obratka, to se ukupno vreme ciklusa može napisati u sledećem obliku:

$$t_c = t_h + t_p \quad (5.10)$$

t_p – pomoćno vreme koje definisano sledećim izrazom:

$$t_p = t_m + t_{kl} + t_z + t_s + t_{mp} + t_o + t_{iz} \quad (5.11)$$

gde je:

t_m – vreme podmazivanja i čišćenja kalupa

t_{kl} – vreme posluživanja otvorenog kalupa

t_z – vreme zatvaranja kalupa

t_s – vreme uključivanja tj. pokretanja jedinice za brizganje

t_{mp} – vreme približavanja mlaznice

t_o – vreme otvaranja kalupa

t_{iz} – vreme izbacivanja

U literaturi postoji metodologija daljeg strukturiranja i određivanja pojedinih komponenti pomoćnog vremena.

Izvori netačnog određivanja vremena hlađenja

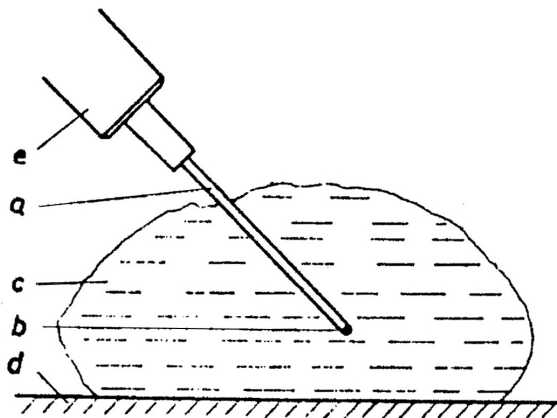
- Stvarno vreme hlađenja se razlikuje od izračunatog t_h
- Ipak izvedene jednačine su prilično pouzdane
- Izvori netačnosti u određivanju t_h su različiti:

1. Netačnosti usled ne poznavanja toplotnih svojstava polimera

Izrazi za t_h su izvedeni uz pretpostavku da toplotni faktori (λ i a) ne zavise od temperature, što se može prihvatiti kod amorfni polimera. Dodatni problem je što analiza ne obuhvata "proizvodnu prošlost" polimera i nedovoljno tačno poznavanje toplotnih osobina. Kod iste molekularne mase mogu nastati različite osobine polimera zavisno od načina raspodele (strukture) molekula, što značajno utiče na t_h .

2. Netačnosti zbog teškoća u određivanju temperature procesa

Temperatura rastopa (T_T) može se meriti pomoću uređaja-sonde slika 6.5. Međutim, ovakav način merenja uglavnom se koristi u labaratorijskim uslovima.



Slika 6.5: Merenje temperature rastopa ubodnim pirometrom; a – cevčica sonde, b – vrh termopara, c – rastop, d – podloga, e – držka

Merenje treba vršiti kada se uspostavi toplotna ravnoteža. Prečnik sonde je oko 2 mm, a termopar je napravljen od Fe – Konstantan žice. Dubina uranjanja je (8-12)d cevčice.

Poteškoće su još veće kod merenja temperature u šupljini (zidu) kalupa, pogotovu što tu temperstura nije jedinsvena u svim pravcima kalupa.

Merenje temperature kalupa vrši se takođe sa sondom koja se ugrađuje nekoliko milimetara ispod površine gravure kalupa, što unapred izaziva grešku merenja, koja će procentualno biti viša kod nižih temperatura prerade polimera.

6. RAZMENA TOPLOTE U KALUPIMA ZA INJEKCIONO PRESOVANJE

Kvalitet otpreska dobijenog injekcionim oblikovanjem u najvećoj meri zavisi od temperaturnog polja i pritiska u kalupu za vreme procesa oblikovanja. No ipak se toplotnom proračunu kod ove tehnologije još uvek ne poklanja dovoljno pažnje.

Za realizaciju proračuna razmene toplote u kalupu potrebno je:

1. Objasniti temperaturno polje u kalupu
2. Definisati toplotni bilans.

6.1. Temperaturno polje u kalupu

Na sl.6.1. prikazano je temperaturno polje u nepokretnoj polovini kalupa za slučaj presovanja pločastog obradka:

- a) temperaturno polje bez dodira sa otpreskom
- b) temperaturno polje tokom proizvodnje otpresaka

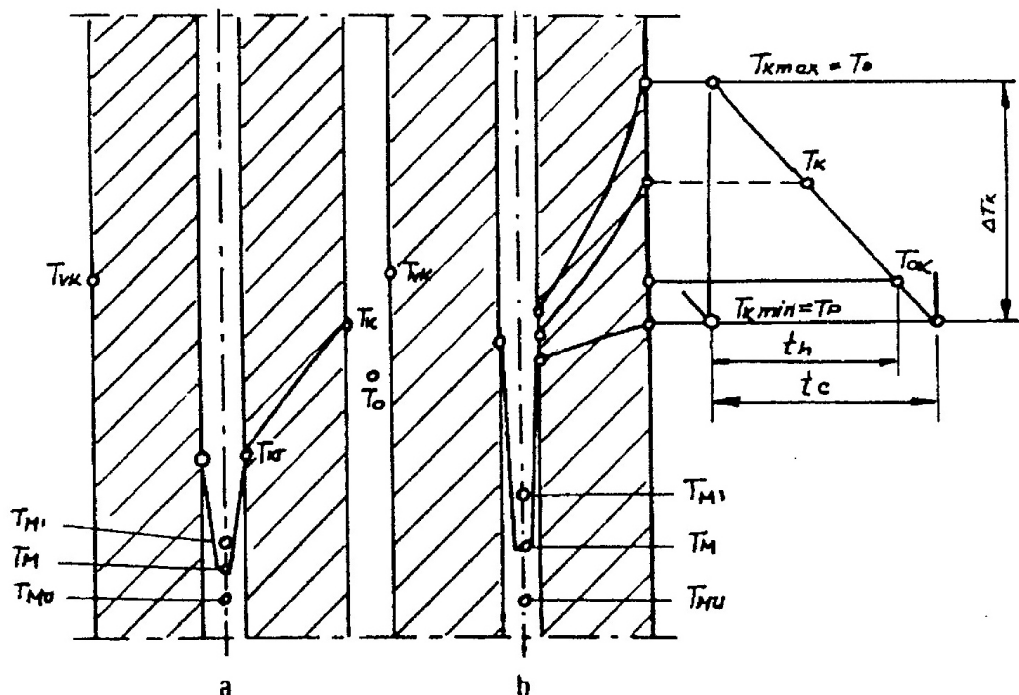
Sa desne strane ploče ostvaruje se kontakt sa rastopljenim polimerom. Kroz ploču prolaze kanali za hlađenje sa odgovarajućim medijumom. Kad se kroz kanale propusti medijum, njegova temperatura se menja od ulaza (T_{MU}) do izlaza (T_{MI})

Karakteristične temperature medija su:

T_{MU} – ulazna temperatura medija

T_{MI} – izlazna temperatura medija

$$T_M = \frac{T_{MN} + T_{MI}}{2} - \text{temperatura medija za temperiranje}$$



Slika 6.1: Presek nepokretne kalupne ploče sa ucrtanim temperaturnim poljem: a – temperirana ploča bez dodira sa rastopom, b – temperaturno polje tokom proizvodnje pri toplotnom ravnotežnom stanju

T_{OK} – temperatura u trenutku otvaranja kalupa

T_O – temperatura okoline

T_{VK} – spoljna temperatura kalupa

T_P – početna temperatura kalupa (T_{min})

$T_{kmax}=T_D$ – maksimalna temperatura kalupa

T_K – temperatura kalupa (nominalana):

$$T_K = \frac{T_{kmin} + T_{kmax}}{2} = \frac{T_P + T_D}{2} \quad (6.1)$$

T_{KT} – temperatura kanala za temperiranje

Zaključak:

Temperatura u kalupu nije jedinstvena već se može govoriti o temperaturnom polju, koje se ciklično menja.

6.2. Opšte zakonitosti razmene toplote u kalupu

Razmena toplote u kalupima za injekciono presovanje obahvaćeno je **bilansom toplote** :

SUMA RAZMENJENJE TOPLOTE U KALUPU =0

$$\Phi_P + \Phi_O + \Phi_M = 0 \quad (6.2)$$

Φ_P – toplota koju rastopljeni materijal preda kalupu

Φ_O – toplota razmenjena sa okolinom može biti >0 ili <0

Φ_M – toplota razmenjena medijem za temperiranjem.

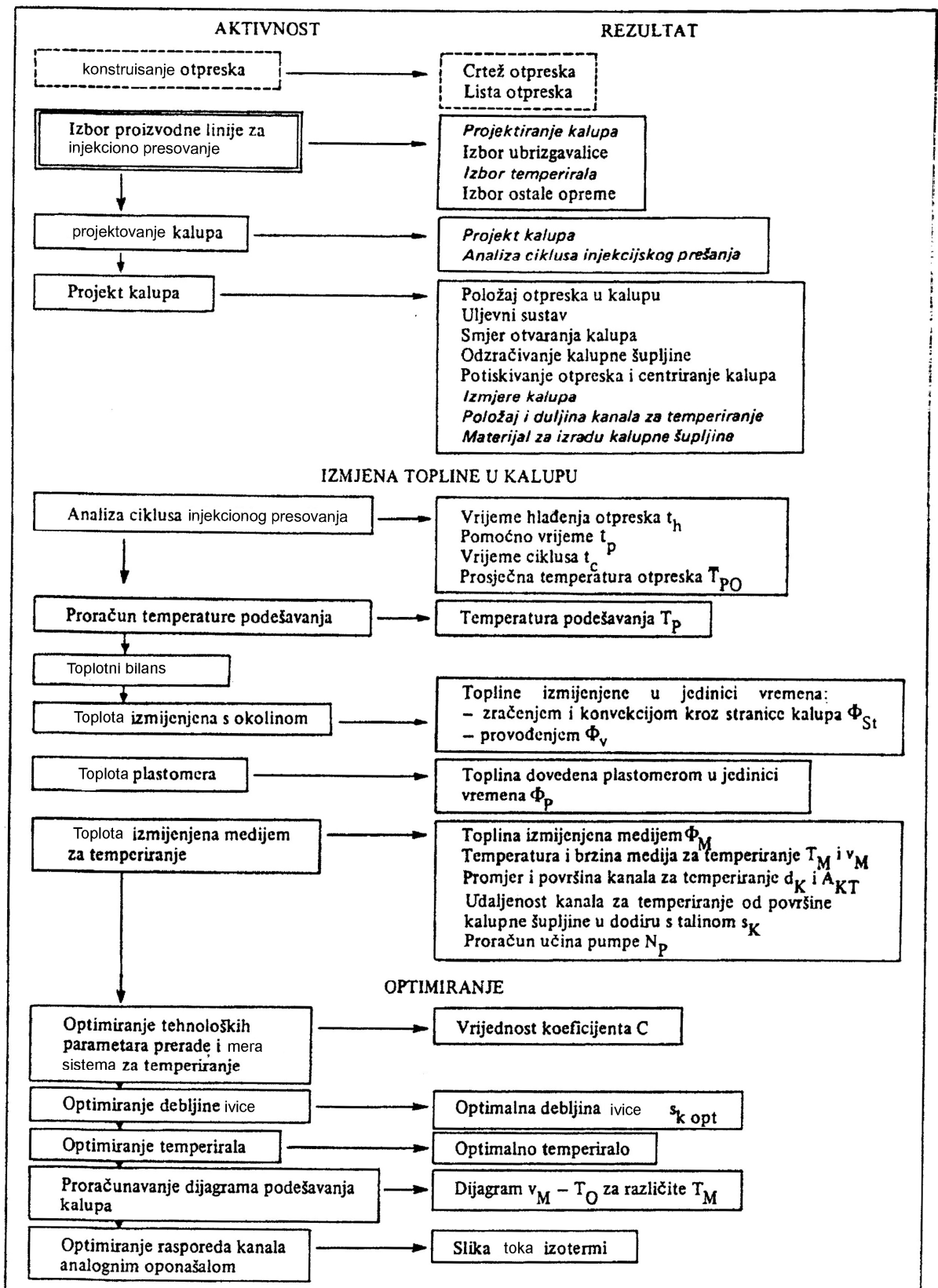
Toplota dovedena rastopljenim polimerom uglavnom se predaje kalupu. Manji deo te toplote odlozi u okolinu.

Ako se temperatura na spoljnoj površini kalupa znatnije razlikuje u odnosu na temperaturu okoline dolazi do razmene toplote sa okolinom.

Medijum za temperiranje može dovoditi a može i odvoditi toplotu zavisno od potrebe procesa temperiranja.

Tok proračuna razmene toplote određen je algoritmom tabela 6.1.

Tabela 6.1



6.3. Temperatura podešavanja kalupa T_P – proračun

Na temperaturu T_K , koju predstavlja srednju vrednost, utiče donja temperatura (T_P) koja se može podešavati, a izračunava se:

$$T_P = \frac{T_K(b_K + b_P) - (1 - A)T_T b_P}{b_K + b_P A} \quad (6.3)$$

T_T – temperatura rastopa

$A = t_w / 2t_c$ – bezdimenzioni faktor

t_w – vreme hlađenja otpreska

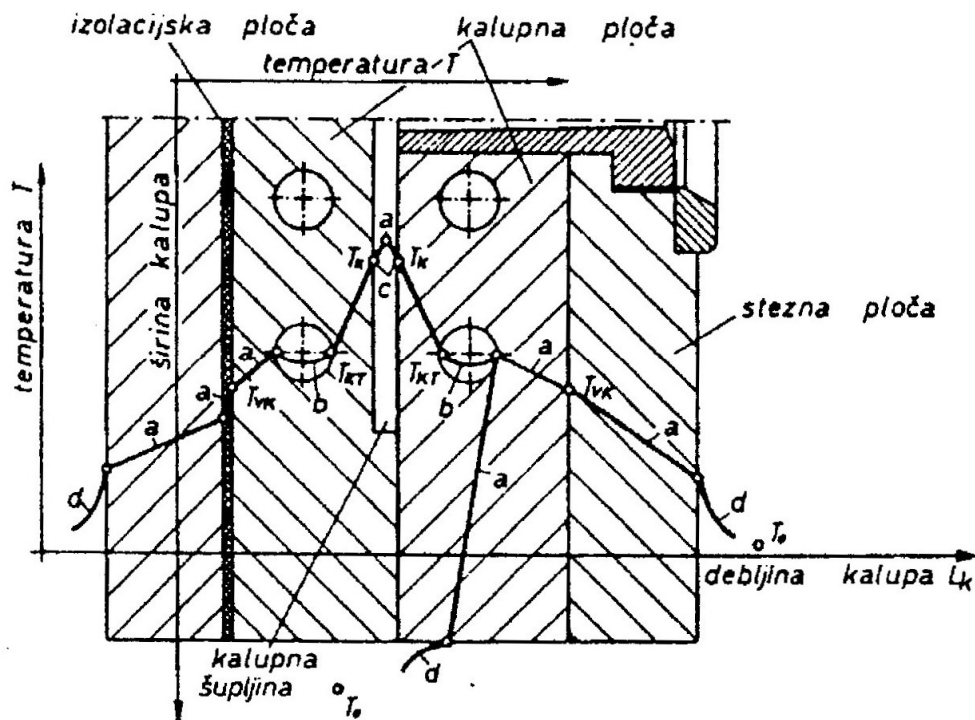
t_c – vreme ciklusa presovanja

6.4. TOPLOTNI BILANS

Toplota koju dovede rastopljeni polimer u kalup mora biti odvedena iz kalupa u okolinu (Φ_O) i odvedena pomoću medija (Φ_M).

6.4.1 RAZMENA TOPLOTE KALUP – OKOLINA

Između kalupa i okoline postoji značajna razmena toplote, koja može biti veća nego razmena preko medijuma za temperiranje. Ako je temperatura okoline viša od temperature kalupa, tada okolina zagreva kalup i obrnuto. Niska temperatura kalupa se koristi u slučaju veće proizvodnosti.



Slika 6.2 Kalup kao termodinamički sistem, $T=f(L_K)$; a – provođenje, b – konvekcija, c – provođenje+zračenje, d – konvekcija+zračenje

Toplotna razmena sa okolinom:

$$\Phi_0 = \Phi_{St} + \Phi_{sp} + \Phi_V \quad (6.4)$$

Φ_{St} – toplotna razmena zračenje i kovekcija. (z+k) kroz stranice kalupa u jedinici vremena

Φ_{sp} – toplotna razmena (z+k) kroz steznu ploču; ova komponenta se može zanemariti

Φ_V – toplota razmenjena provođenjem kroz nosače kalupa

Toplota razmenjena kroz stranice kalupa iznosi:

$$\Phi_{St} = \Phi_z + \Phi_k \quad (6.5)$$

Φ_z - toplota razmenjena zračenjem u jedinici vremena

Φ_k – toplota razmenejna konvekcijom u jedinici vremena

Toplota razmenejna zračenjem:

$$\Phi_z = \alpha_z A_z (T_{vk} - T_o) \quad (6.6)$$

α_z – koeficijent prelaza toplote zračenjem

A_z – površina zračenja

T_o - temperatura okoline

Spoljašnja temperatura kalupa (T_{vk}) izračunava se prema:

$$T_{vk} = 0,823 T_M + 0,423 T_o - 68,96 \quad [K]$$

T_M – temperaturura medija za hlađenje

Drugi izraz za toplotu zračenja:

$$\phi_z = \varepsilon_z \cdot c_z \cdot A_z \left[\left(\frac{T_{VK}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \quad (6.6)$$

ε_z – sposobnost zračenja koja zavisi od materijala i površine:

$\varepsilon_z = 0,25$ – za brušeni čelik

$\varepsilon_z = 0,5$ – za blago oksidiranu površinu

C_z – koeficijent zračenja apsolutno crnog tela

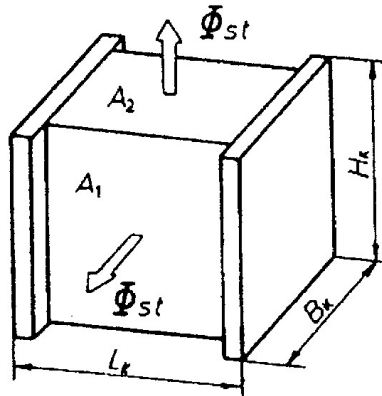
Toplota razmenjena konvekcijom stranica kalupa:

$$\phi_k = \alpha_k \cdot A_k \cdot (T_{vk} - T_o) \quad (6.7a)$$

A_z – ukupna površina kalupa preko koje se vrši razmena toplote sa okolinom konvekcijom (sl. 6.8)

Gornji izraz se može napisati i u sledećem obliku:

$$\phi_k = 2 A_1 \cdot \alpha_k^* (T_{vk} - T_o) \quad (6.7b)$$



Slika 6.3 Površine kalupa na kojima se razmenjuje toplota konvekcijom i zračenjem

gde je:

$$\alpha_k^* = \frac{A_1 + A_2}{A_1} \cdot \alpha_k - \text{konvekcioni koeficijent prelaza toplote}$$

Ukupno razmenjena toplota preko stranica kalupa:

$$\phi_{st} = \phi_z + \phi_k = 2 \cdot A_1 \cdot \alpha_{st}^* (T_{VK} - T_0) \quad (6.8)$$

Gde je α_{st}^* - ukupni koeficijent prenosa toplote:

$$\alpha_{st} = \alpha_k + \alpha_z, \text{ odnosno:}$$

$$\alpha_{st}^* = \frac{A_1 + A_2}{A_1} \cdot \alpha_{st}$$

Toplota razmenjena provođenjem preko nosača kalupa:

$$\phi_V = \beta_V \cdot A_{KS} (T_{VK} - T_0) \quad (6.9)$$

β_V – faktor proporcionalnosti

$$\beta_V = 84 \div 116 \quad [W / m^2 K]$$

$A_{KS} = 2B_k \cdot H_k$ – površina steznih ploča kalupa kojim je kalup pričvršćen na nosače kalupa.

6.4.2. TOPLOTA KOJU DOVODI TERMOPLAST

Toplota koju u jedinici vremena dovodi plastomer:

$$\phi_p = \frac{m_g (h_2 - h_1)}{t_c} \quad (6.10)$$

m_g – masa grozda

h_2 – specifična entalpija pri temperaturi i pritisku prerade

h_1 – specifična entalpija pri prosečnoj temperaturi otpreska pri napuštanju kalupa

Podaci o entalpiji => tab. 6.5.(Čatić, str. 99)
 $h [KWs / kg]$

6.4.3. TOPLOTA RAZMENJENA MEDIJEM ZA TEMPERIRANJE

Iznosi:

$$\phi_M = -(\phi_P + \phi_0) \quad (6.11)$$

Za pločasti otpresak:

$$\phi_M = k \cdot A_{KT} (T_K - T_M) \quad (6.12)$$

k – koeficijent toplotne prohodnosti – jednačina 6.15

A_{KT} – površina kanala za temperiranje

T_M – temperatura medija za temperiranje

Prečnik i površina kanala za temperiranje:

$$d_k = \frac{b_0}{n_k \cdot x_k \cdot \pi} \quad (6.13)$$

b_0 – širina otpreska

n_k – broj kanala za temperiranje

x_k – faktor površine kanala za temperiranje $x_k=0,8 \div 1,2$

Površina kanala:

$$A_{KT} = d_k \cdot l_k \cdot n_k \cdot \pi \quad (6.14)$$

l_k – dužina kanala

d_k -zaokružena vrednost promera kanala za temperiranje

Koeficijent toplotne prohodnosti (k) izračunava se prema izrazu:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (6.15)$$

α_1 – koeficijent prelaza toplote sa zida otpreska na zid kalupa

α_2 – koeficijent prelaza toplote sa zida kanala na medijum za temperiranje

s_i – debljina i-tog sloja;

λ_i - toplotna provodnost i-tog sloja

d_1 -unutrašnji promer gnezda

d_{n+1} -spoljašnji promer gnezda

Kad se u izraz (6.34) unese izraz za k dobija se konačan izraz razmenu toplote preko medija za temperiranje:

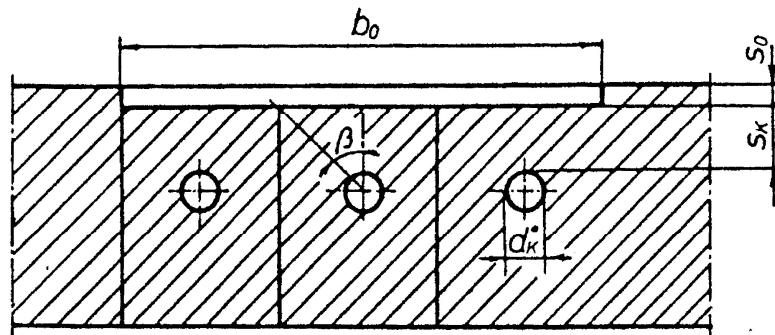
$$\phi_M = \frac{x_s}{\left(\frac{S_K}{\lambda_K} + \frac{1}{a_M}\right)} \cdot A_{KT} \cdot (T_K - T_M) \quad (6.16)$$

λ_K – toplotna prohodnost kalupa

x_s – faktor simetričnosti razmene toplote. Ako se razmena vrši sa oba dela kalupa $x_s=2$

S_K – rastojanje od kanala do površine šupljine

a_M – koeficijent prelaza sa zida kanala na medijum za temperiranje



6.4 Presek pomične kalupne ploče sa kalupnom šupljinom

U gornjem izrazu nepoznate su: S_K , α_M i T_M . Radi toga se u ovom proračunu najpre izračunava veličina S_K a zatim za predpostavljeni temperaturni gradijent ($T_K - T_M$) izračunava se a_M , što se svodi na određivanje brzine medija za temperiranje.

Proračun debljine zida

Izvodi se s obzirom na različite kriterijume:

1) **Kriterijum: Dozvoljeno tangencionalno opterećenje:**

$$S_K = \frac{3 \cdot p_K \cdot d_K}{4\tau_{doz}} \quad (6.17)$$

p_K – pritisak u gravuri kalupa (10^8 Pa ili N/m^2)

τ_{doz} – dozvoljena smicajna čvrstoća

2) **Kriterijum: Dozvoljeno opterećenje na savijanje**

$$S_K = (p_K \cdot d_K^2 / 2\sigma_{doz})^{1/2} \quad (6.18)$$

σ_{doz} – dozvoljen napon na savijanje

Zatim se proverava maksimalni ugib ploče:

$$f_{\max} \leq \frac{p_K \cdot d_K^2}{S_K} \cdot \left[\frac{d_K^2}{32E \cdot s_K^2} + \frac{0,15}{G} \right] \quad (6.19)$$

Pri čemu su G i E moduli klizanja i elastičnosti ploče

3) Kriterijum: Kriterijum akumulirane toplote:

$$S_K \geq \left[\frac{(\phi_{PD} + \phi_0 + \phi_M) \cdot t_C}{b_0 l_K c_K \rho_K (T_K - T_{KT})} \right] \quad (6.20)$$

Φ_{PD} – dovedena toplota: $\Phi_{DP} = m_g(h_2 - h_1)/t_h$

ρ_K – gustina materijala kalupa

c_K – specifična toplota materijala kalupa

T_{KT} – temperatura kanala za temperiranje

4) Kriterijum: Dozvoljeni ugao izoterme (β)

$$S_K = \left(\frac{b_0}{n_K \cdot \text{tg} \beta} - d_K \right) \cdot \frac{1}{2} \quad (6.21)$$

$$\beta_{\text{doz}} = 25 \div 40^\circ - \text{sl.6.4.}$$

Koeficijent prelaza toplote a_M :

U literaturi postoji više izraza za proračun koeficijenta prelaza toplote a_M . Za slučaj da u kalupu ima više međusobno spojenih kanala:

$$a_M = 0,021 \cdot \frac{\lambda_M}{d_K} \cdot \left(\frac{d_K \cdot V_M}{v_M} \right)^{(0,8+0,01n_p)} \cdot P_r^{0,4} \cdot K \quad (6.22)$$

λ_M – toplotna provodljivost medija za temperiranje

V_M – brzina protoka medija

v_M - kinematska viskoznost medija

n_p – broj dvostrukih promena mera tečenja medija

P_r - v_M / a_M - Prandalov broj

K – korektivni koeficijent $K = f(l_K/d_K)$

L_K – dužina kanala

Tabela 6.2

L_K/d_K	5	10	15	20	30	50
K	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1

Drugi izraz za a_M :

$$\alpha_M = 0,037 \cdot \frac{\lambda_M}{d_K} \left[\left(\frac{d_K V_M}{v_M} \right)^{0,75} - 180 \right] P_r^{0,42} \left[1 + \left(\frac{d_K}{l_K} \right)^{0,67} \right] \quad (6.23)$$

važi za $Re = d_K V_M / v_M < 10^6$; $0,6 < P_r < 500$

Sada su na raspolaganju sve jednačine koje omogućuju izračunavnje toplote razmenjene preko medijuma za temperiranje (Φ_M), tj. mogu se proračunati T_M i V_M , kao i podesivi parametri u procesu. Pri tome se obično zahteva kod kvalitetnih otpresaka da temperaturni gradijent ($T_K - T_M$) bude što manji.

Drugi način određivanja T_M (Wübken)

$$T_M = T_K - \frac{\phi_P \cdot s_K}{x_S A_{OT} \lambda_K} - \frac{\phi_P + \phi_O}{x_S A_{KT} \alpha_M} \quad (6.24)$$

$A_{OT} = b_{ol_0}$ – površina otpreska

Na osnovu dosadašnjih rezultata proračuna T_M prema navedenim izrazima ne može se jednoznačno dati prenost bilo kojem od njih. Poslednji izraz pogodan je za proračun kod dvodimenzionalnih otpresaka pomoću računara.

Toplotna svojstva medija za temperiranje

Ako je temperatura medija za temperiranje niža od 278 K ili viša od 368 K potrebno je vodi dodavati aditive protiv smrzavanja, odnosno isparavanja. U tu svrhu koristi se etilenglikol u odnosu 20% etilenglikola+ostatak voda.

Svojstva mešavine fluida za temperiranje sada su:

1. **Gustina:** $\rho_M = (1-x)\rho_A + x\rho_B$

2. **Kinematska viskoznost:** $\nu_M = (1-x)\nu_A + x\nu_B$

3. **Toplotna provodljivost:**

$$\lambda_M = \frac{(1-x)\rho_A}{(1-x)\rho_A + x\rho_B} \cdot \lambda_A + \frac{x\rho_B}{(1-x)\rho_A + x\rho_B} \cdot \lambda_B$$

4. **Specifični toplotni kapacitet:**

$$C_M = \frac{(1-x)\rho_A}{(1-x)\rho_A + x\rho_B} \cdot C_A + \frac{x\rho_B}{(1-x)\rho_A + x\rho_B} \cdot C_B$$

U gornjim jednačinama x je udeo komponente B u mešavini.

Potrebna količina medijuma za temperiranje, pad pritiska u kanalima za temperiranje

Uređaj za temperiranje mora da zadovoljava:

1. da ima odgovarajuću moć zagrevanja, odnosno hlađenja
2. da ima odgovarajuću temperaturu medijuma za temperiranje
3. da ima određenu brzinu temperiranja
4. da ima odgovarajuću pumpu, protok i pad pritiska

Izbor pumpe

Za poznatu količinu toplote koju medijum za temperiranje treba da odvede iz kalupa, potrebno je odrediti razliku temperature medijuma na ulazu i izlazu iz kalupa. Ta razlika ne bi trebala da prelazi **pet stepeni**, u protivnom potrebno je ponoviti toplotni proračun, sa promenjenim nekim konstruktivnim parametrima, kao npr. prečnik kanala.

Temperaturna razlika medijuma:

$$(T_{MI} - T_{MU}) = \Delta T_m = \frac{4\Phi_M}{\pi \cdot d_K^2 \cdot c_M \cdot V_M \cdot \rho_M} \quad (6.25)$$
$$T_{MU} = T_M - \frac{\Delta T_M}{2}$$

Pad pritiska u sistemu za temperiranje

Pad pritiska u sistemu ΔP_{st} mora biti takav da obezbedi dovoljnu brzinu strujanja fluida:

$$\Delta P_{ST} = \Delta P_{Ka} + \Delta P_{Te}$$

Pad pritiska u kanalima za hlađenje:

$$\Delta P_{Ka} = \Delta P_T + \Delta P_L = \frac{V_M^2}{2} \cdot \rho_M \cdot \left(\xi \cdot \frac{l_K}{d_K} + 1.5 \cdot m_p \right) \quad (6.26)$$

ΔP_T – pad pritiska usled trenja

ΔP_L – pad pritiska zbog lokalnih gubitaka

ξ – koeficijent otpora strujanju koji zavisi od Re

$$2300 < Re < 100000 \quad \xi = 0.3164 \sqrt[4]{1/Re}$$

$$100000 < Re < 200000 \quad \xi = 0.0054 + 0.3964 \cdot Re^{-0.3}$$

$$Re < 2300 \quad \xi = 64/Re$$

m_p – broj promena smera medijuma za temperiranje

ΔP_{Te} – pad pritiska u uređaju za temperiranje-procenjuje se

Snaga pumpe

$$N_{Pe} = \frac{V_M \cdot d_K^2 \cdot \Delta P_{St} \cdot \pi}{4 \cdot \eta_P} \quad (6.27)$$

η_p - koeficijent korisnog dejstva za pumpu

7. PARAMETRI PROCESA INJEKCIONOG PRESOVANJA

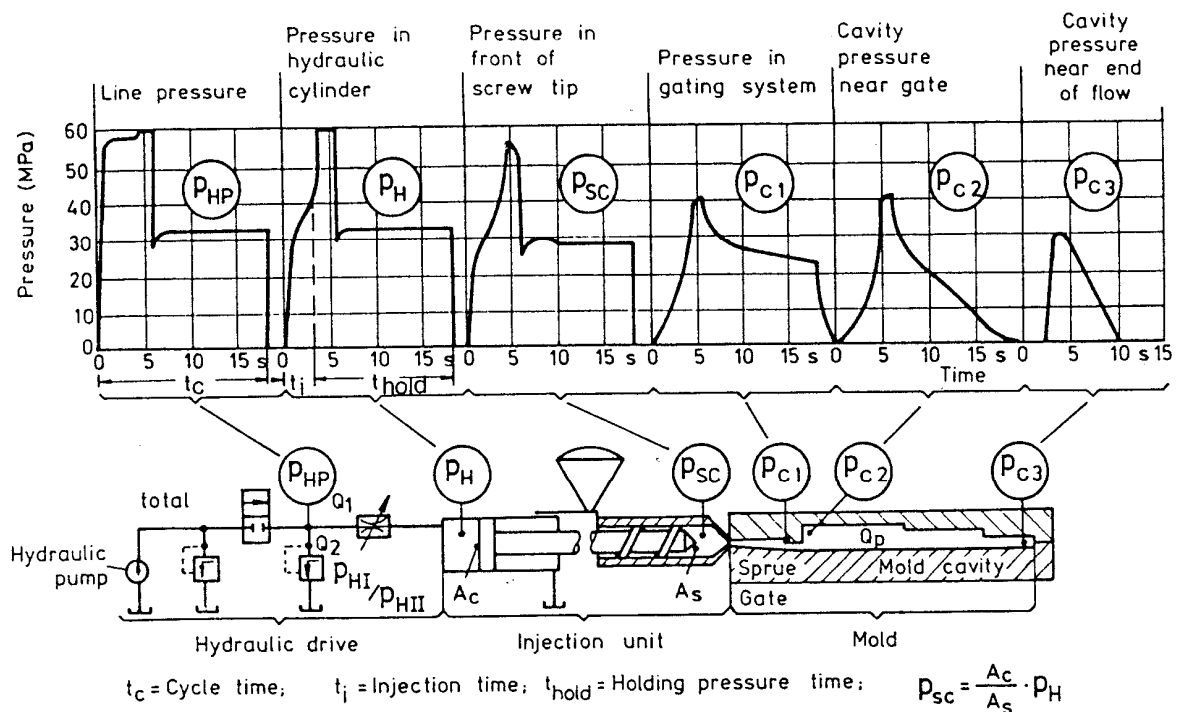
Parametri procesa injeccionog presovanja direktno utiču na kvalitet otpreska, te se njihove vrednosti moraju pratiti i održavati u toku radnog ciklusa. Radi njihovog pravilnog shvatanja potrebno je, najpre, da se pravilno terminski definišu, što je urađeno standardnom Evropske zajednice (EEC-European Economic Community). Ti standardi poznati su pod nazivom EUROMAP [4]. Najbitniji ulazni parametri injeccionog presovanja su:

- *Pritisak*
- *Temperatura i*
- *Brzina puža*

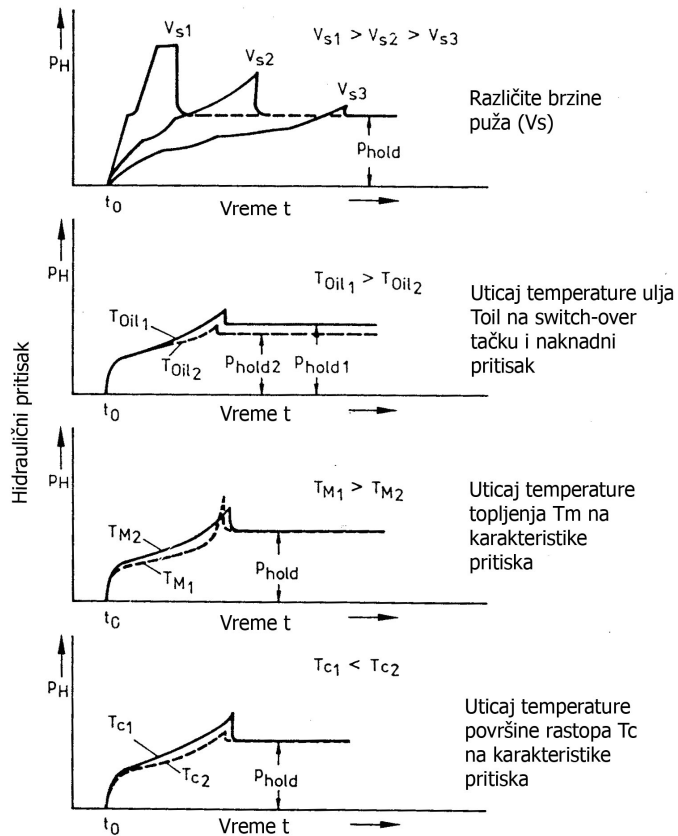
1. Pritisak

Hidraulični pritisak - je pritisak u pogonskom cilindru mašine potreban da se savladaju otpori u mlaznici, ulivnom sistemu i otpori tečenja u kalupu. Sličan je sa pritiskom na čelu puža. Generalno naglo raste u kratkom vremenskom periodu u skladu sa otporima tečenja rastopljenog polimera (slika 7.1).

Hidraulični pritisak zavisi od brzine aksijalnog pomeranja puža (v_s), temperature ulja (T_{oil}), temperature rastopljenog polimera (T_M) i temperature kalupa (T_k), slika 7.2.



Slika 7.1 Pritisak u karakterističnim tačkama pri injeccionom presovanju [4]

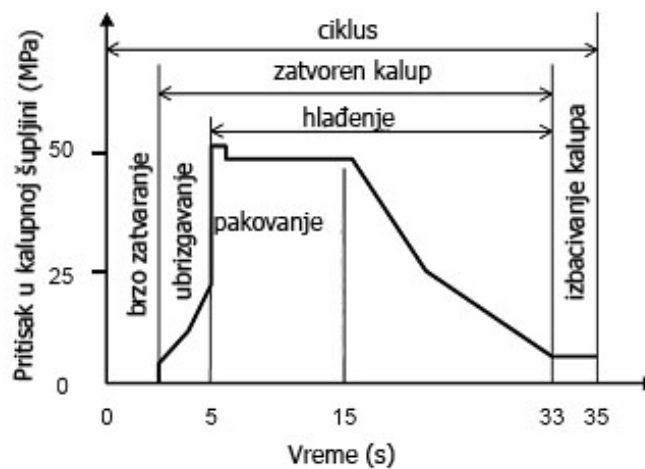


Slika 7.2 Uticaj različitih faktora na pritisak u hidrauličnom cilindru [4]

Pritisak u kalupu – menja se od tačke do tačke u kalupnoj šupljini (slika 7.3) i veoma je bitan za kvalitet otpreska.

Na snimljenom dijagramu pritiska u kalupu u zavisnosti od vremena (slika 7.3) uočavaju se tri segmenta, odnosno faze:

1. ubrizgavanje – punjenje kalupa
2. kompresija polimera
3. zadržavanje pod pritiskom



Slika 7.3 Promena pritiska u kalupu tokom ciklusa injektionog presovanja [4]

Pritisak u kalupu u tesnoj je vezi sa kvalitetom otpreska. Pritisak u fazi ubrizgavanja utiče na izgled obratka a pritisak u fazi naknadnog delovanja utiče na dimenzije obratka. Pritisak u fazi ubrizgavanja zavisi od otpora u mlaznici i ulivnom sistemu ali ne utiče bitnije na proces oblikovanja. Kompresioni i naknadni pritisak (*faza 2 i 3*) su važni za konačne dimenzije otpreska.

Profil pritiska u kalupu ukazuje i na eventualne probleme i teškoće u procesu presovanja. **Previsok pritisak u fazi kompresije** ukazuje na ozbiljne probleme. Rezultat je nekorektno postavljenog prelaza na niži pritisak, i uzrokuje lošiji kvalitet otpreska. Zbog toga se trenutak promene (snižavanja) pritiska mora podešavati. Na profil pritiska u kalupu utiče brzina puža u fazi ubrizgavanja i temperatura šupljine kalupa.

Pritisak ubrizgavanja za pojedine polimere dat je u tabeli 7.1.

Tabela 7.1 pritisak ubrizgavanja pojedinih polimera

Materijal	Potreban injekcioni pritisak (MPa)		
	Materijali sa malom viskoznošću	Materijali sa srednjom viskoznošću	Materijali sa visokom viskoznošću
ABS	80 - 110	100 - 130	130 - 150
POM	85 - 100	100 - 120	120 - 150
PE	70 - 100	100 - 120	120 - 150
PA	90 - 110	110 - 140	> 140
PC	100 - 120	120 - 150	> 150
PMMA	100 - 120	120 - 150	> 150
PS	80 - 100	100 - 120	120 - 150
Rigid PVC	100 - 120	120 - 150	> 150
Termoset	100 - 140	140 - 175	175 - 230
Elastomeri	80 - 100	100 - 120	120 - 150

Naknadni pritisak i promena pritiska (switch-over). Naknadni pritisak predstavlja pritisak koji započinje fazom hlađenja i kao što je već rečeno njime se obezbeđuje dopunsko popunjavanje kalupa pri hlađenju otpreska. Naknadni pritisak je u principu niži od pritiska u fazi ubrizgavanja, a posebno je važno proceniti vremenski trenutak njegove promene. Pokazalo se da se trenutak promene pritiska može odrediti ako se neprekidno prati promena pritiska u kalupu.

2. Temperatura

Značajan uticaj na proces injekcionog presovanja ima:

- 1. temperatura rastopljenog polimera***
- 2. temperatura ulja u hidrauličnom sistemu***
- 3. temperatura kalupa***

Temperatura rastopljenog polimera

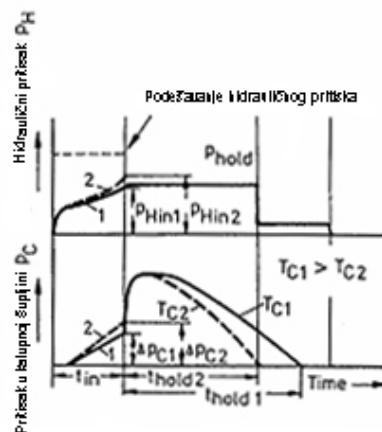
Termodinamičke karakteristike rastopa, kao na primer viskoznost, entalpija i specifična zapremina zavise od temperature rastopljenog polimera, što utiče i na pritisak u kalupu i kvalitet otpreska. Proizvođači granulata daju podatke o relevantni parametrima obrade izabranog materijala pri injekcionom presovanju i terba ih koristiiti pri podešavanju mašine.

Temperatura hidrauličnog ulja

Energetski gubici u ventilima, pumpi i cevovodu, zavise od viskoznosti ulja, a viskoznost veoma zavisi od temperature. Zbog toga sva kretanja prilikom injekcionog presovanja zavise od temperature ulja. Radi toga, mašina mora imati mogućnost kontrole i podešavanja temperature hidrauličnog ulja pre početka proizvodnje.

Temperatura kalupa

Temperatura kalupa je glavni uticajni faktor ekonomičnosti procesa, tačnosti dimenzija i kvaliteta popunjavanja kalupa. Temperatura kalupa zavisi od sistema hlađenja. Uticaj temperature kalupa na profil pritiska u kalupu (p_C) i u hidrauličnom sistemu (p_H) dat je na slici 7.4.



Slika 7.4 Uticaj temperature kalupa na pritisak u kalupu [4]

3. Brzina puža

Brzina aksijalnog pomeranja puža utiče na proces injekcionog presovanja u fazi ubrizgavanja. Porastom brzine puža raste i hidraulični pritisak (p_H) i pritisak u kalupu (p_C). Pad pritiska u kalupu opada porastom aksijalne brzine puža.

LITERATURA

1. Čatić I.: Proizvodnja polimernih tvorevina, BIBLIOTEKA POLIMERSTVO – SREIJA ZELENA, Zagreb, 2006.
2. Čatić I.: Uvod u proizvodnju polimernih tvorevina, BIBLIOTEKA POLIMERSTVO, Zagreb, 1990.
3. Rapajić B. Prerada plastičnih masa ekstrudiranjem, Privredni pregled, Beograd, 1976.
4. Johanaber F.: Injection Molding Machines, A Users gude 3rd Edition, Hanser Publisher, Munich Viena New Yoork, 1994.
5. Nađ M.: Termoplastične mase, prerada postupkom injekcionog presovanja, Publicitas, Zagreb, 1974.
6. Nagdi K.: Rubber as an Engineering Material – Guideline for Users, Hanser, new York, 1993.
7. Plavšić M.: Polimerni materijali, naučna knjiga, Nauka i Inženjerstvo, Beograd, 1996.
8. Rauwendaal C.: Polymer Extrusion, 4th edition, HANSER, Munich, 2001.
9. Strong A.B: Plastics, materials and processing, Prentice Hall, Ohio, 2000.
10. Vilotić D., Milikić D., Plančak M., Milutinović M: Obrazovanje inženjera proizvodnog mašinstva iz oblasti tehnologija oblikovanja plastike na fakultetu tehničkih nauka u novom sadu, 4. kongres inženjera plastičara i gumara (K-IPG 2006), Vršac, juni 2006.
11. <http://www.arburg.com/>
12. <http://www.krauss-maffei.com/>
13. <http://www.engelglobal.com/>
14. <http://www.moldflow.com/stp/>
15. www.nd.edu/~manufact/powerpoint/ch18.ppt
16. www1.jsc.nasa.gov/bu2/conferences/NCAS2005/papers/...
17. www.modernplastics.com/powerpoint/module1.ppt
18. http://www.gatewaycoalition.org/files/kinzel/plastics/NVPlastics_IJ.ppt
19. www.lme.co.uk/downloads/JB-May05.ppt
20. http://pasadena.wr.usgs.gov/scign/group/dome/psi_report/REPORT.PPT
21. <http://www.milacron.com/investors/2006Presentations/MZdec06investpresentation.ppt>
22. <http://kazmer.uml.edu/Staff/Archive/Competitive%20Injection%20Molding%20by%20Kazmer.ppt>
23. http://cache.husky.ca/pdf/2002_agm_presentation.ppt
24. http://www.mscsoftware.ru/document/conf/EuroConf2000/technical_papers/montell_italia.ppt
25. <http://www.husky.ca/aboutusky/index.html>
26. D:\DOWNLOAD\Johannsen_2.ppt
27. <http://www.ugs.com/index.shtml>
28. <http://www.telsonic.com/haupt.asp?spr=2>
29. <http://www.injection-molding-resource.org/injection-molding-machines/>