

PRELUCRAREA POLIMERILOR PRIN EXTRUDERE SI INJECTIE

Dr.ing. Maricel Danu

Prof. dr.ing. Constanța Ibănescu

Dr.ing. Sorin Alexandru Ibănescu

CUPRINS

Capitolul I. EXTRUDEREA..... 5

1.1. Scurtă descriere a procesului-----	5
1.2. Părțile componente ale unui extruder -----	5
1.3. Principiul operării extruderelor -----	7
1.4. Caracteristicile extruderului-----	8
1.5. Extrudare cu destinație specială -----	11
1.6. Teoria procesului de extrudare-----	13
1.6.1. Schema logică a tratamentului teoretic	13
1.6.2. Curgerea în zona de alimentare	13
1.6.3. Curgerea în zona de plastifiere (tranziție)	21
1.6.4. Curgerea în zona de dozare – pompare	23
1.6.5. Distribuția presiunii în lungul canalului melcului	65
1.7. Calculul filierelor-----	66
1.8. Clasificarea și construcția mașinilor de extrudare -----	69
1.8.1. Clasificarea mașinilor de extrudare.....	69
1.8.2. Construcția mașinilor de extrudare	70
1.9. Dispozitive auxiliare -----	88
1.9.1. Alimentatoare.....	88
1.9.2. Dispozitive de răcire.....	90
1.9.3. Calibroare	93
1.9.4. Trăgătoare.....	94
1.9.5. Înfășurătoare	96

Capitolul II. MASINI DE INJECTIE 99

2.1. Introducere -----	99
2.2. Scheme de principiu ale mașinilor de injecție-----	99
2.3. Considerații teoretice asupra procesului de injecție -----	103
2.3.1. Procese în cilindrul mașinii	103
2.3.2. Procese în matriță.....	107
2.3.3. Influența presiunii și a temperaturii	111
2.4. Construcția mașinilor de injecție -----	113
2.4.1. Clasificarea mașinilor de injecție.....	113
2.4.2. Componenta mașinilor de injecție.....	114

2.5. Probleme de calcul la mașinile de injecție-----	126
2.5.1. Coeficientul de contracție.....	126
2.5.2. Productivitatea	127
2.5.3. Capacitatea de plastifiere a melcului-piston.....	127
2.5.4. Puterea de acționare a melcului-piston.....	129
2.5.5. Cantitatea de căldură necesară încălzirii și plastifierii materialului.....	129
Bibliografie.....	130

Capitolul I. EXTRUDEREA

1.1. Scurtă descriere a procesului

Extruderea poate fi definită ca un proces de prelucrare a materialelor prin curgerea forțată a acestora printr-o filieră.

Extruderea primului material plastic a avut loc în 1870 când s-au obținut bare din nitrat de celuloză prin extrudare sub presiune. Mașinile de extrudare cu melc au început să fie utilizate înaintea anului 1830. Primele mașini au prelucrat cauciuc.

În prezent procesul de extrudare se folosește în vederea prelucrării unei game foarte variate de materiale (polimeri, metale, etc.) pentru obținerea unei diversități foarte mari de produse, de la bare și țevi până la filamente sau fire pline utilizate ca fire sau fibre. Extruderea se folosește, de asemenea, pentru obținerea unor profile, folii, pentru acoperirea cablurilor, hârtiei sau a altor materiale. În sfârșit, extruderea poate fi folosită ca un proces intermediar în fluxul prelucrării polimerilor, cum ar fi spre exemplu pentru amestecare, compoundare sau pur și simplu pentru transportul polimerilor.

Mașinile moderne de extrudare prelucrează debite uniforme și omogene de materiale, drept urmare obținându-se produse foarte diverse și cu indici calitativi ridicați.

1.2. Părțile componente ale unui extruder

Părțile componente ale extruderului sunt prezentate în figura 1.1. Polimerul, sub formă de granule, pulbere, benzi, etc. se alimentează în mașină dintr-o pâlnie de alimentare, după care este preluat de unul sau mai mulți melci și transportat spre capul de extrudare. Datorită căldurii

transferate prin pereții cilindrului (uneori și de la melc) sau a aceleia care rezultă din disiparea energiei mecanice de antrenarea melcului, polimerul se plastificază și se topește. Topitura rezultată este omogenizată și forțată să treacă prin placa de distribuție și pachetul de site după care curge prin filieră unde se dă forma produsului. Placa de distribuție are rolul să susțină sitele care filtrează topitura și creează presiunea necesară înaintea filierei.

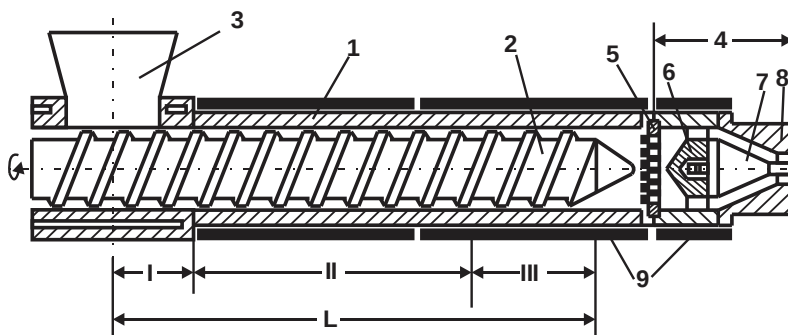


Figura 1.1. Părțile componente ale unui extruder cu un melc

În zona de alimentare cilindrul este răcit pentru a preveni blocarea orificiului de alimentare cu polimer plastifiat.

Acționarea melcului se face de la un motor electric de regulă, prin intermediul unui sistem de reducere a turației fie pe cale mecanică, hidraulică sau electrică. Întreaga mașină și partea de acționare este susținută de un batiu fixat pe o placă de fundație.

Caracteristica constructivă cea mai importantă este diametrul melcului extruderului. Acesta poate să varieze în limite foarte largi, în prezent construindu-se mașini de extrudare cu melci cu diametre de peste 500 mm.

După cum rezultă de mai sus, mașina de extrudare are următoarele funcții mai importante:

- transportul materialului;

- încălzirea și plastifierea;
- omogenizarea topiturii, dozarea și pomparea acesteia prin filieră.

Datorită acestor funcții cuplul cilindru – melc poate fi împărțit în cel puțin trei zone, anume: zona de alimentare sau transport, zona de plastifiere și zona de dozare – pompare. Menționăm că nu se poate face o delimitare precisă a celor trei zone, lungimea lor depinzând de caracteristicile geometrice ale melcului și cilindrului, regimul termic și proprietățile materialului prelucrat.

Cele mai multe mașini de extrudare sunt cu un melc, dar în ultimii ani s-a extins utilizarea mașinilor cu mai mulți melci, mai ales cele cu 2 melci. Avantajul mașinilor cu 2 melci constă în capacitatea de omogenizare mult mai mare, aceasta făcând ca aceste mașini să fie larg utilizate pentru obținerea unui produs cu proprietăți deosebite, cum sunt țevile.

1.3. Principiul operării extruderelor

În acest paragraf se dă un sumar al operării extruderelor pentru a ne forma o imagine asupra caracteristicilor curgerii care influențează performanțele mașinii.

Într-o mașină convențională materialul este transportat de la pâlnia de alimentare până la filieră în trei stări: solidă, un amestec de material solid și topitură și în stare de topitură omogenizată.

În partea de dozare – pompare există trei tipuri de curgere cu trei debite asociate:

- curgerea prin antrenare;
- curgerea sub acțiunea gradientului de presiune;
- curgerea în jocul dintre spiră și cilindru.

Debitul mașinii este dat de debitul prin antrenare minus debitele sub acțiunea gradientului de presiune și cel de joc.

Curgerea prin antrenare constă în acțiunea de transport determinată de mișcarea melcului. Aceasta poate fi înțeleasă cel mai bine dacă se imaginează o mașină cu rezistență la filieră neglijabilă (cilindru deschis la capătul melcului). Curgerea prin antrenare este deci o deplasare volumetrică a materialului prin canalul melcului. Aceasta va fi influențată de geometria canalului și viteza de rotație a melcului.

Curgerea sub acțiunea gradientului de presiune este determinată de presiunea din capul de extrudare și este considerată ca o curgere inversă prin canalul melcului. Pentru a înțelege aceasta, să presupunem că melcul este staționar și că în filieră există topitură la o anumită presiune. În aceste condiții ipotetice canalul melcului joacă rolul unei conducte rectangulare prin care topitura poate curge de la filieră spre gura de alimentare. În condițiile reale de operare totuși, curgerea sub acțiunea gradientului de presiune este numai o reacție la curgerea prin antrenare, determinată de rezistența filierei și presiunea acesteia. În nici o condiție nu există curgere în sens invers prin canalul melcului, pe direcția axială a melcului.

Curgerea sub acțiunea gradientului de presiune este influențată de factori ca: adâncimea canalului, lățimea canalului, diametrul melcului, lungimea zonei de dozare - pompare, vâscozitatea topiturii și presiunea topiturii din filieră.

1.4. Caracteristicile extruderului

Mai sus s-au arătat tipurile de curgere care au loc în extruder. Înțelegerea acestora permite să se formuleze caracteristicile extruderului, adică relația dintre debitul mașinii și presiunea topiturii.

În figura 1.2 sunt date caracteristicile a trei tipuri de mașini de extrudare cu zonele de dozare – pompare lucrând în condiții identice (aceeași turație, vâscozitate, fluid Newtonian, condiții izoterme). Pe aceeași

figură se arată și caracteristicile a două filiere, una mică și una mare (cu rezistență mare, respectiv, mică).

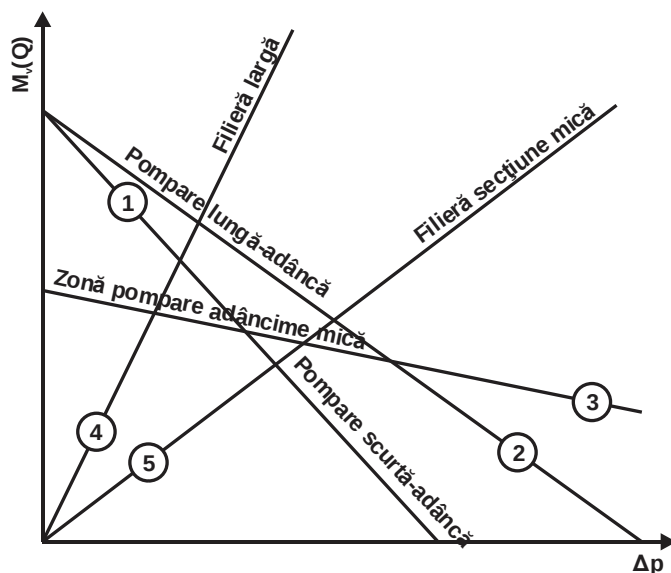


Figura 1.2. Caracteristicile melcului și a filierei

Debitul unui melc scurt cu adâncime mare a canalului va fi foarte mare la rezistență mică a canalului, din cauza debitului de antrenare mare. În același timp, acest tip de melc este foarte sensibil la variațiile de presiune din cauză că adâncimea mare favorizează curgerea sub acțiunea gradientului de presiune (rezistență mică). Așa se explică scăderea pronunțată a debitului pe măsură ce crește căderea de presiune.

Dreapta (2) reprezintă caracteristica unui melc lung cu adâncimea canalului mare. Debitul prin antrenare la presiune zero este același, dar efectul presiunii se reduce datorită creșterii lungimii și deci a rezistenței.

Dacă melcul are o zonă de dozare – pompare cu adâncimea canalului mică (linia 3), debitul la presiune zero este mai mic din cauza debitului prin antrenare mai mic (care este proporțional cu presiunea). De asemenea,

sensibilitatea la presiune este mai mică din cauza rezistenței hidraulice care este mai mare.

Dacă este extrudat un fluid Newtonian, variația turației melcului determină o deplasare paralelă a acestor linii. Variația vâscozității rezultă în modificarea pantei.

Liniile (4) și (5) arată caracteristicile a două filiere. La presiune zero, debitul este nul la ambele filiere. Pe măsura creșterii presiunii, debitele cresc, cel prin orificiu mai larg crescând mai repede, datorită rezistenței mai mici a acesteia. Intersecția caracteristicilor dă punctele de operare a cuplului extruder – filieră.

Consumul de energie și căldura generată în materialul extrudat prin disiparea energiei mecanice sunt determinate de forfecarea materialului în canalul melcului. Energia consumată pentru forfecarea polimerului este convertită în căldură care determină creșterea temperaturii topiturii. Cantitatea de căldură generată crește cu creșterea lățimii canalului în raport cu adâncimea, a lungimii canalului și cu creșterea vitezei melcului. Proprietățile reologice ale polimerului influențează de asemenea cantitatea de căldură generată. Vâscozitățile mari și o dependență slabă a acestora cu temperatura contribuie la creșterea temperaturii.

Căldura generată depinde și de rezistența filierei. Filierile cu secțiune mică determină o creștere a cantității de căldură. Rezistența mare a filierei determină o presiune ridicată, reduce debitul și prin urmare produce o forfecare mai puternică a topiturii.

Considerațiile de mai sus explică de ce pachetul de site sau ventilele pot determina o creștere a temperaturii topiturii în filieră sau a omogenității.

În paragrafele precedente au fost analizate din punct de vedere calitativ unele corelații între variabilele procesului de extrudare. Pentru o analiză corectă a performanțelor unui extruder este necesară totuși o analiză cantitativă detaliată.

Un singur exemplu justifică pe deplin această necesitate. Se poate întâmpla ca la viteze mari ale melcului, zona de dozare – pompare a melcului să lucreze strangulată, din cauză că capacitatea zonei de alimentare și transport și a celei de tranziție de a alimenta topitura este mai mică decât capacitatea de pompare. Capacitatea de plastifiere, în anumite cazuri, poate să depindă în mare măsură de capacitatea de transfer de căldură a pereților cilindrului. În aceste cazuri, vitezele mărite ale melcului nu vor mări capacitatea de plastifiere, în timp ce debitul zonei de pompare crește direct proporțional cu viteza. Ca rezultat, capacitatea zonelor de transport și plastifiere pot să limiteze debitul extruderului. În aceste condiții pot apare întreruperi ale extruderului sau strangulări.

1.5. Extrudare cu destinație specială

În multe cazuri, prin extrudare se prelucrează polimeri care conțin substanțe volatile, cum sunt umiditatea, solvenți sau gaze adsorbite. Îndepărtarea acestora din topitură înaintea filierei este o condiție esențială pentru obținerea unor produse fără bule înglobate. Două metode se pot utiliza pentru degazarea topiturii. Prima metodă folosește cilindri prevăzuți cu orificii de degazare. O a doua metodă de degazare constă în evacuarea gazelor printr-un orificiu practicat în melc, care comunică cu sistemul de aspirație prin miezul melcului. În ambele cazuri, eliminarea volatilelor are loc într-o zonă a melcului în care canalul este parțial umplut cu topitură, aceasta realizându-se printr-o creștere a secțiunii.

Extruderile utilizate pentru degazări au melcii formați din 4 zone.

Zona de alimentare. Are un canal adânc și deci o capacitate mare de transport. În această zonă, polimerul este încălzit și topit. Spira melcului poate fi întreruptă pe ultima porțiune pentru a preveni creșterea excesivă a presiunii.

Zona de dozare. Determină debitul mașinii și are canalul cel mai puțin adânc.

Zona de degazare sau extracție. Are canalul de aproximativ 4 ori mai adânc decât zona de dozare, lucrând strangulat, deoarece este alimentat dintr-o zonă cu capacitate de transport mai mică. Din această cauză numai o parte din canal este plin cu polimer, permițând astfel degazarea volatilelor. Ștuțul de degazare este plasat în spatele spiralei de la capătul zonei.

Zona de pompare. Aceasta trebuie să creeze presiunea necesară pentru a forța extrudatul să curgă prin filieră. De asemenea, trebuie să aibă o capacitate de pompare mai mare ca a zonei de dozare pentru a nu inunda zona de extracție. Adâncimea optimă este cu 50% mai mare ca a zonei de dozare.

Extrudare pentru amestecare

Se utilizează frecvent pentru compoundarea și amestecarea materialelor plastice. Melcii acestor extrudare au o construcție specială fiind prevăzuți cu așa numitele zone pentru amestecare intensivă sau cu zone pentru malaxare, așa cum se va vedea la paragraful despre construcția și caracteristicile melcilor.

Extrudare cu descărcare intermitentă

Data fiind capacitatea de plastifiere mai mare a extruderelor față de mașinile de injecție s-a încercat să se opereze extruderele cu descărcare intermitentă. Tehnica aceasta și-a găsit aplicații în construcția mașinilor de injecție moderne. Când cilindrul este închis, melcul se retrage pe măsură ce acumulează material omogenizat în fața duzei. Când aceasta din urmă se deschide, materialul este injectat în matriță, după care melcul avansează spre duză. Un nou ciclu începe, mașina putând eventual să alimenteze mai multe matrițe.

1.6. Teoria procesului de extrudare

1.6.1. Schema logică a tratamentului teoretic

Zona de dozare – pompare a fost tratată cel mai mult încât cele mai sofisticate analize se referă la aceasta. Curgerea materialului în canalul melcului este de tip laminar, iar pentru modelarea acesteia va trebui să se aplice cele trei ecuații de conservare de bază – conservarea masei, energiei și a impulsului – plus ecuațiile care descriu starea fizică a materialului. Rezolvarea analitică a acestor ecuații este însă deosebit de dificilă, datorită complexității sistemului de extrudare. De aceea, în majoritatea abordărilor se introduc simplificări cu ajutorul cărora ecuațiile de bază se transformă în ecuații mai simple, care pot fi rezolvate cu eforturi mult mai mici.

Pentru motivele de mai sus vor fi prezentate la început toate simplificările introduse pentru analiza procesului de extrudare, după care vor fi derivate ecuațiile diferențiale ale curgerii topiturii prin canalul melcului. Se va insista asupra distribuției vitezei în canal, aceasta permițând formarea unei imagini reale asupra mecanismului procesului. Ecuațiile curgerii reprezintă imaginea locală a procesului și acestea vor fi derivate atât pentru fluide Newtoniene, cât și pentru cele nenewtoniene.

Final se vor prezenta ecuațiile de operare ale extruderelor considerându-se cele două tipuri fundamentale – operare izotermă și cea adiabatică. Pentru scopuri practice se va analiza cuplul extruder – filieră.

1.6.2. Curgerea în zona de alimentare

În zona de alimentare, polimerul este transportat în stare solidă. Pentru materiale cu densitate mare nu se ridică probleme speciale pentru transportul în zona de alimentare. Nu același lucru se poate spune pentru materialele cu densitate mică (în grămadă).

Se pare că în zona de alimentare, melcul funcționează ca un transportor pur. În condiții ideale, particulele de polimer se mișcă paralel cu axa melcului. În aceste condiții, viteza de transport se poate calcula ușor. La anumită distanță în cilindru mecanismul de transport se modifică. Particulele de material se compactizează și se deplasează ca un piston solid. Deplasarea acestuia are loc datorită forțelor de frecare exercitate la suprafețele cilindrului și a melcului.

Ipoteza de bază în analiza transportului materialului solid în zona de alimentare constă în presupunerea că particulele solide sunt împachetate și formează un piston „elastic” care nu curge sub acțiunea tensiunii de forfecare. Asupra pistonului acționează forțele de frecare la suprafața cilindrului și a melcului. Analiza se simplifică dacă se consideră cilindrul staționar și melcul mobil, așa cum arată în figura 1.3, unde au fost desfășurate atât cilindrul, cât și melcul.

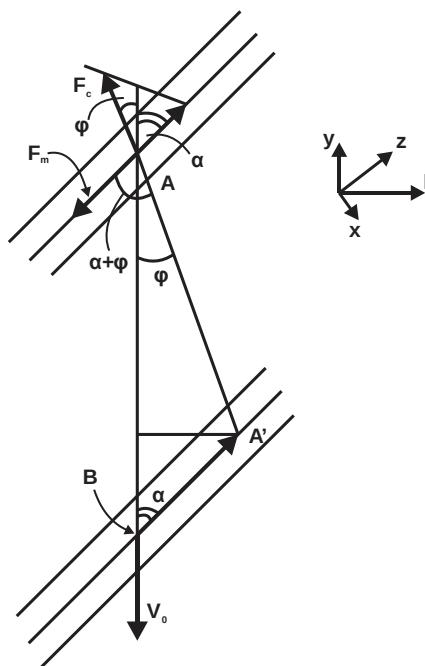


Figura 1.3. Imagiile desfășurate ale cilindrului și melcului

Poziția inițială a melcului este în partea superioară. Deplasarea canalului se realizează după direcția vectorului viteză V_0 . În timpul t deplasarea este AB , punctul A deplasându-se în A' . Deci pistonul de material solid s-a deplasat pe distanța BA' în direcția canalului. Mișcarea punctului A relativ la suprafața cilindrului este pe linia AA' .

Viteza cu care pistonul se deplasează în lungul canalului se poate calcula în funcție de unghiul α :

$$V = \frac{BA'}{t} = \frac{BA' \cdot V_0}{AB} = V_0 \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha + \varphi)} \quad (1.1)$$

unde α este unghiul de înclinare a filetului. Ecuația (1.1) poate fi transformată în:

$$V = \frac{V_0}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \varphi} \quad (1.2)$$

Să considerăm forțele de frecare care acționează asupra pistonului de material. Pentru condiții staționare, aceste forțe trebuie să fie în echilibru și deci avem:

$$F_m = F_c \cos(\alpha + \varphi) \quad (1.3)$$

Deoarece α și φ trebuie să fie totdeauna pozitive, forțele de frecare acționează asupra pistonului de material dinspre cilindru. Cilindrul trebuie să depășească totdeauna forțele de frecare care acționează de la suprafața melcului. Ecuația (1.3) poate fi scrisă în forma:

$$\cos(\alpha + \varphi) = \frac{F_m}{F_c} = R \quad (R \leq 1) \quad (1.4)$$

Valoarea lui R fiind cunoscută, se poate determina valoarea unghiului φ din ecuația (1.4), după care se poate determina viteza de transport a pistonului solid cu ecuația (1.2).

Singura ipoteză introdusă până acum a fost că materialul solid se transportă ca un piston solid.

Pentru a analiza în continuare transportul materialului solid prin zona de alimentare, sunt necesare noi ipoteze asupra forțelor F_m și F_c . Înainte de aceasta să analizăm câteva cazuri limită pentru raportul lor R .

De notat pentru $R \geq 1$, mișcarea nu este posibilă, în acest caz unghiul φ fiind egal cu zero. Ecuația (1.2) arată în acest caz că $v=0$. Deci, pistonul nu avansează în lungul canalului, ci se mișcă în cerc, condiție în care operația de extrudare se întrerupe.

Al doilea caz limită este acela în care melcul este deosebit de neted sau „alunecos”, încât nu exercită nici o forță de frecare asupra pistonului de material. Dacă nu există gradient de presiune în canal, valoarea lui $F_m = 0$ și $R = 0$. Din ecuația (1.4) se vede că $(\alpha + \varphi) = 90^\circ$. Ecuația (1.2) devine:

$$V = \frac{V_0}{\cos \alpha + \sin \alpha \operatorname{ctg}(90 - \alpha)} = V_0 \cos \alpha = V_{z0} = 2\bar{V} \quad (1.5)$$

ceea ce ne arată că viteza pistonului este egală cu componenta pe direcția z . Deoarece viteza medie de antrenare este $v_{z0}/2$, melcul este capabil să transporte materialul solid la un debit volumic dublu față de debitul fluidului în condiții de antrenare (ceea ce este de așteptat) (vezi figura 1.4).

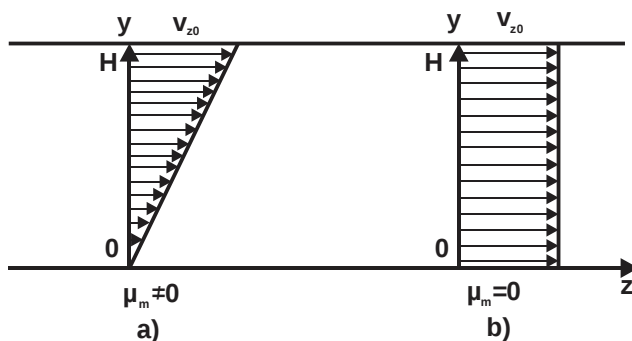


Figura 1.4. Transportul materialului solid de către melc

$$a) \quad M_v = \frac{BHV_{z0}}{2} = M_{va} / \text{fluid}$$

$$b) \quad M_v = BHV_{z0} = \frac{M_v}{\Delta T}$$

Se vede deci că în aceste condiții, debitul este egal cu debitul prin deplasare totală ($M_v/\Delta T$).

Să considerăm și un al treilea caz special. Dacă s-ar practica canale longitudinale pe suprafața interioară a cilindrului pentru a limita mișcarea pistonului solid la 0, mișcarea în direcția axială, atunci unghiul $\varphi = 90^\circ$ și ecuația (1.2) devine:

$$V = \frac{V_0}{\cos \alpha} = \frac{2\bar{V}}{\cos^2 \alpha} \quad (1.6)$$

În concluzie, avem condițiile:

Condiții limită	Viteza pistonului solid
$R \geq 1$	0
$R = 0$	$2\bar{V}$
$\varphi = 90^\circ$	$2\bar{V}/\cos^2 \alpha$

Să considerăm acum cazul în care mișcarea pistonului în canal încetează. Ecuația (1.2) arată că aceasta are loc când φ tinde la zero. Să notăm raportul forțelor în aceste condiții cu R^* . Din ecuația (1.4) se vede că raportul R^* este o funcție de unghiul de înclinare a filetului. Pentru unghiuri mai mari este necesar un raport de forțe mai mare ca în cazul unghiurilor mici. Spre exemplu, când φ tinde la 90° operarea staționară se obține numai cu un singur melc cu coeficientul de frecare zero, condiție care nu poate fi realizată practic. Pe de altă parte, pe măsura reducerii lui α , poate fi tolerat un raport mai mic al forțelor. La limită, pentru α tinde la 0, R^* tinde la 1.

Pare rezonabil să se presupună că la operarea unui extruder raportul R nu este constant. Pentru un set dat de condiții, raportul variază între anumite limite. În plus, pe măsură ce se modifică viteza melcului, temperatura cilindrului, presiunea în filieră și alți factori, este normal să ne așteptăm la o schimbare a lui R . În cazul melcilor cu α mare în zona de

alimentare apare un mare risc de alimentare neuniformă sau chiar de întrerupere a alimentării.

Dacă analiza de mai sus ne arată că valorile reduse ale lui α dau rezultate pozitive, aceasta nu indică cât de mic să fie acest unghi. Pentru a răspunde la această întrebare este necesară o analiză mai detaliată a forțelor care intervin.

Să considerăm simplificarea că pistonul exercită presiunea „hidrostatică” în mod egal, pe toate suprafețele cu care este în contact. Mai mult, se presupune că nu există gradient de presiune în direcția canalului. În aceste condiții forțele tangențiale (de frecare) exercitate asupra pistonului se obțin din produsul forțelor normale cu coeficienții de frecare, forțele normale fiind date de produsul presiunii cu suprafețele. Deci:

$$R = \frac{F_m}{F_c} = \frac{A_m \cdot p \cdot \mu_m}{A_c \cdot p \cdot \mu_c} = \frac{A_m \cdot \mu_m}{A_c \cdot \mu_c} \quad (1.7)$$

unde A este aria în contact cu pistonul solid. Dacă neglijăm suprafața spirei avem cele două suprafețe:

$$A_c = \pi DL \quad (1.8)$$

$$A_m = \pi (D - 2H_0) L + 2 \int_{R_0}^R z dr \quad (1.9)$$

Mărimile de mai sus rezultă din figura 1.6.

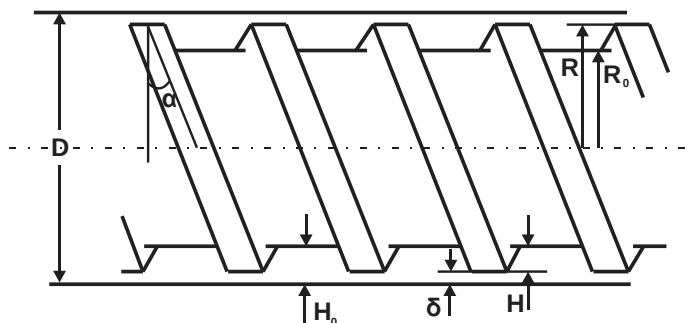


Figura 1.6. Mărimile caracteristice ale cilindrului și melcului

În formulele de mai sus, z este lungimea desfășurată a canalului, iar L este lungimea melcului, măsurată pe axă.

$$z = \frac{L}{\sin \xi} = \frac{L}{\sin \alpha(r)} \quad (1.10)$$

unde r este poziția radială. Din ultimele ecuații rezultă:

$$\frac{A_m}{A_c} = 1 - 2 \left(\frac{H_0}{D} \right) + \frac{2}{\pi D} \int_{R_0}^R \frac{dr}{\sin \xi} \quad (1.11)$$

Lățimea canalului B nu variază cu r și avem:

$$B = \pi D \sin \alpha \quad (1.12)$$

La diferite înălțimi ale canalului avem:

$$\pi D \sin \alpha = \pi D_0 \sin \xi_0 = \pi D(r) \sin \xi = 2\pi r \sin \xi \quad (1.13)$$

unde ξ_0 este unghiul elicei, A_m este suprafața miezului, iar D_0 este diametrul miezului melcului.

$$\sin \xi = \frac{D \sin \alpha}{2r} \Rightarrow \frac{A_m}{A_c} = 1 - 2 \left(\frac{H_0}{D} \right) + \frac{2}{\pi D} \int_{R_0}^R \frac{dr}{\frac{D \sin \alpha}{2r}} \Rightarrow$$

$$\frac{A_m}{A_c} = 1 - 2 \left(\frac{H_0}{D} \right) + \frac{4}{\pi D^2 \sin \alpha} \int_{R_0}^R r dr \quad (1.14)$$

$$\int_{R_0}^R r dr = \frac{1}{2} r^2 \Big|_{R_0}^R = \left(R^2 - R_0^2 \right) \frac{1}{2} = \frac{1}{2} (R - R_0)(R + R_0)$$

$$\frac{A_m}{A_c} = 1 - 2 \frac{H_0}{B} + \frac{2(R - R_0)(R + R_0)}{\pi D^2 \sin \alpha} \quad (1.15)$$

$$\frac{A_m}{A_c} = 1 - 2 \left(\frac{H_0}{D} \right) \left[1 - \frac{1 - \frac{H_0}{D}}{\pi \sin \alpha} \right] \quad (1.16)$$

Deci cu ajutorul ecuației (1.16) se determină raportul A_m/A_c . Apoi se determină R cu ecuația (1.7), unghiul α cu ecuația (1.4) și viteza materialului v cu ecuația (1.2).

Debitul de material va fi:

$$M_v = BHV \quad (1.17)$$

Debitul de material pe o rotație a melcului poate fi determinat și cu formula:

$$\frac{M_v}{N} = \pi^2 DH_0 (D - H_0) \left[\frac{tg\varphi tg\alpha}{tg\varphi + tg\alpha} \right] \quad (1.18)$$

unghiul α putând fi determinat din ecuația:

$$\begin{aligned} \cos \varphi = K \sin \varphi + C (K \sin \xi_0 + C \cos \xi_0) + \frac{2H_0}{t} (KCtg\xi_0 + E^2) + \\ + \frac{H_0 E}{L \cdot f_c} \sin \bar{\xi} (E \cos \bar{\xi} + k \sin \bar{\xi}) \ln \frac{p_2}{p_1} \end{aligned} \quad (1.19)$$

unde:

$$K = \frac{E(tg\bar{\xi} + f_m)}{1 - f_m tg\bar{\xi}} \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned} C = \frac{D - 2H_0}{D} \\ E = \frac{D - H_0}{D} \end{aligned} \quad (1.21)$$

$\bar{\xi}$ - unghiul de înclinare a filetului la adâncimea medie a canalului;

f_c - coeficientul de frecare dintre pistonul solid și suprafața cilindrului;

f_m - coeficientul de frecare dintre pistonul solid și suprafața melcului;

t - pasul filetului;

p_1, p_2 - presiunea materialului la capătul și începutul zonei de alimentare.

1.6.3. Curgerea în zona de plastifiere (tranziție)

În această zonă are loc transformarea polimerului în topitură. Încălzirea și topirea polimerului se poate realiza, în principiu, pe două căi, după sensul transferului de căldură și sursa acesteia:

1. prin transmiterea căldurii prin conductivitate și convecție de la suprafața încălzită a cilindrului mașinii;
2. prin disiparea energiei mecanice de acționare a melcului.

Cantitatea de căldură transmisă după prima metodă depinde de suprafața cilindrului, caracteristicile fizice ale polimerului și condițiile curgerii prin canalul melcului.

După a doua metodă, capacitatea de topire depinde de puterea melcului. În general, prin această metodă se realizează încălziri și topiri mai uniforme, datorită circulației mai intense din canalul melcului, determinată de turația mai mare a acestuia.

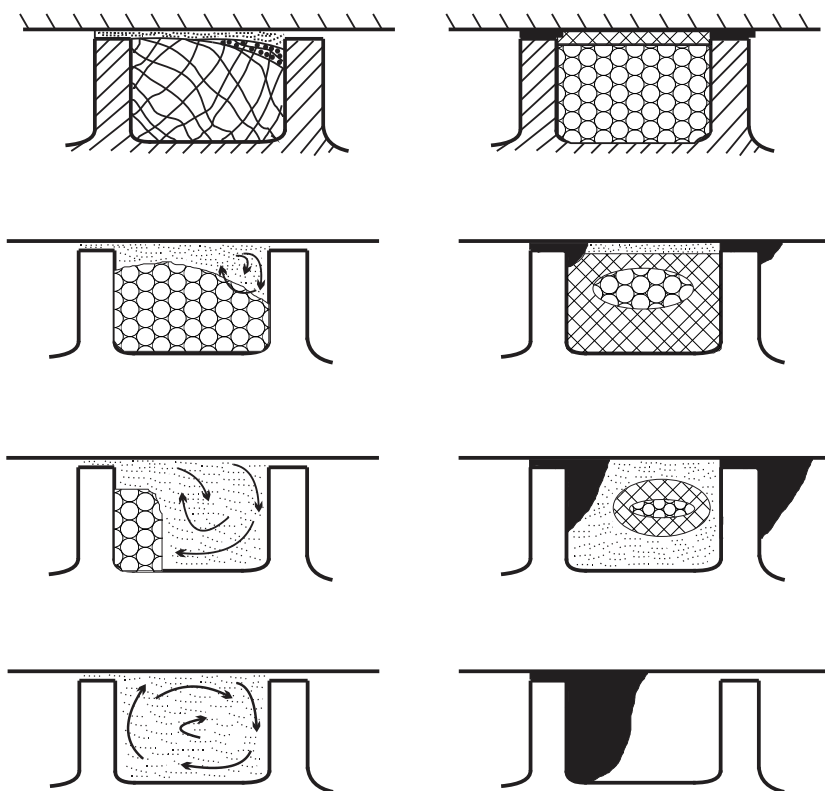
Încălzirea și topirea materialului după prima metodă are loc după mecanisme diferite și depinde în general de adâncimea canalului și unele proprietăți ale materialului prelucrat. În cazul adâncimilor mici se realizează o circulație mai intensă, gradientii de temperatură pe adâncime sunt mai mici și încălzirea și topirea se realizează ca în cazul metodei a doua.

În cazul canalelor cu adâncime mare unde avem gradienti mari de temperatură, mecanismul topirii depinde de capacitatea de aderare a materialului la suprafața cilindrului încălzit.

Mecanismul topirii în cazurile în care materialul aderă sau nu aderă la suprafața cilindrului este reprezentat în figura 1.7. Pentru materialele care aderă se disting trei zone distincte: granule, amestec granule – topitură și topitură. Topitura aderentă la suprafața interioară a cilindrului este desprinsă de către spira melcului și colectată în canal, realizându-se o circulație internă care contribuie la procesul de transfer prin convecție și la realizarea unei omogenizări a topiturii.

În cazul în care topitura nu aderă la suprafața interioară a cilindrului apar patru zone: granule, granule sinterizate, topitură neomogenă și topitură omogenă. La suprafața pistonului de material se formează un strat de granule sinterizate, neaderent la suprafața cilindrului. Pe această suprafață începe să se topească materialul, iar topitura rezultată este colectată în spatele spirei.

Datorită complexității procesului de încălzire și topire a polimerului în canalul melcului, tratarea cantitativă a procesului de plastifiere este încă imposibil de abordat.



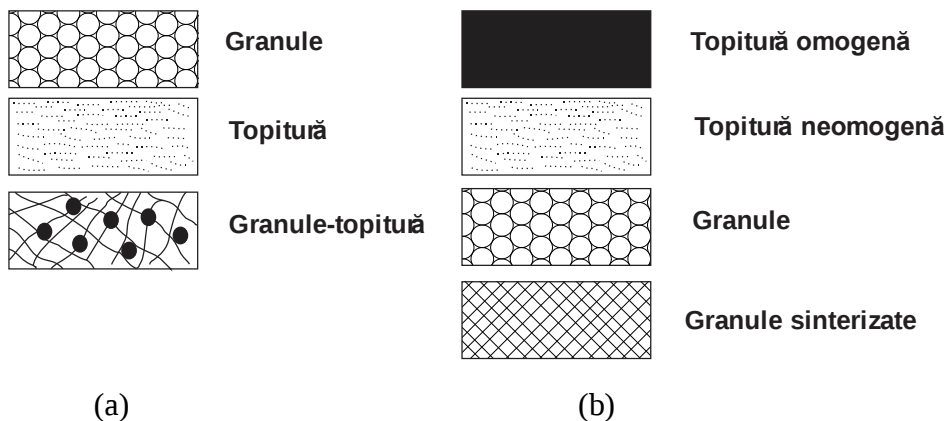


Figura 1.7. Mecanismul plastifierii materialelor aderente (a) și neaderente (b)

1.6.4. Curgerea în zona de dozare – pompă

1.6.4.1. Ecuațiile curgerii

1.6.4.1.1. Introducere

Ecuațiile curgerii unui extruder sunt ecuații diferențiale de performanță în raport cu distanța considerată în lungul canalului melcului. Cu ajutorul lor se poate calcula distribuția vitezei la o anumită distanță dată și se poate determina debitul de topitură. De asemenea, cu aceste ecuații se pot face calcule privind puterea necesară pentru acționarea melcului.

1.6.4.1.2. Simplificări introduse

Ecuațiile care descriu curgerea topiturii prin canalul melcului (în condiții izoterme) sunt:

1. Ecuația de continuitate

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta t} = -\rho [\nabla \cdot \vec{v}] \quad (1.22)$$

2. Ecuația de mișcare

$$\rho \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = [\nabla \cdot \tau] - \nabla P + \rho g \quad (1.23)$$

3. Ecuația energiei

$$\rho C_v \frac{\Delta T}{\Delta t} = -[\nabla \cdot q] - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) [\nabla \cdot \vec{v}] + [\tau : \nabla \vec{v}] \quad (1.24)$$

Ecuația (1.23) este aplicarea legii a II-a a mecanicii unui volum elementar, adică

$$m \cdot a = \sum F_i \text{ sau } \rho \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = F_{\text{viscoasă}} + F_{\text{presiune}} + F_{\text{gravitațională}}$$

Pentru a analiza curgerea topiturii în canalul melcului este suficient să se rezolve ecuația (1.23). Pentru aceasta se introduc următoarele simplificări:

1. Suprafețele laterale ale spirei sunt normale la axul melcului. S-a constatat că eroarea debitului nu depășește 4% prin introducerea acestei simplificări;
2. Adâncimea canalului este constantă pe lățime;
3. Suprafața spirei este netedă (aceasta este valabil în general la melcii noi; în tehnologiile mai recente de construcție a melcilor, cum este tehnica bimetalică, rezistența acestora este mult mai mare și durata de exploatare crește foarte mult);
4. Forțele gravitaționale se neglijează;
5. Forțele inerțiale se neglijează (vâscozitatea topiturii este mare și curgerea este laminară);
6. Canalul melcului se desfășoară în plan, ca în figura de mai jos; se consideră cilindrul în mișcare și spirele melcului fixe.

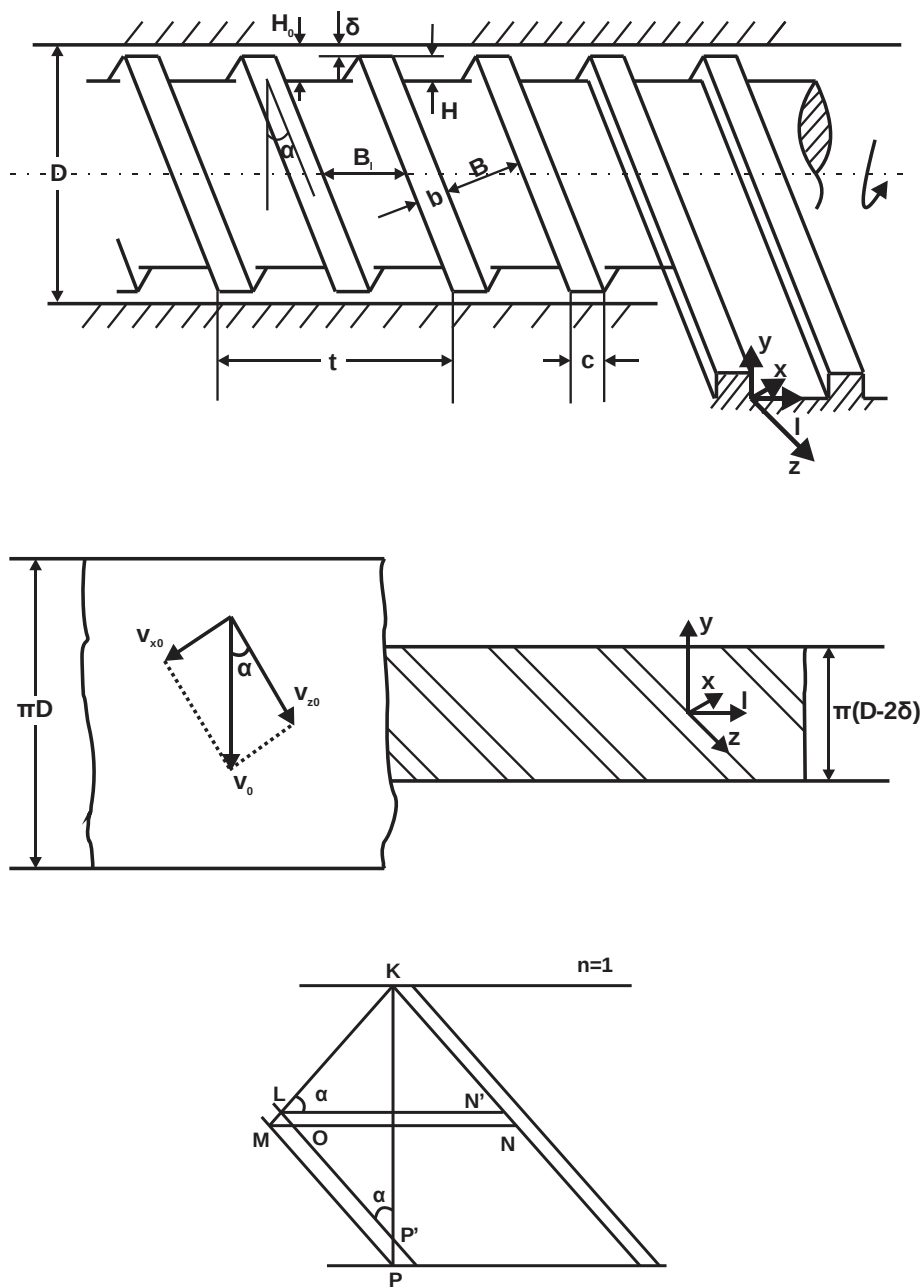


Figura 1.8. Desfășurarea în plan a canalului melcului

$$V_0 = \pi DN \quad (1.25)$$

N – turația melcului

$$V_{z0} = V_0 \cos \alpha \quad (1.26)$$

$$V_{x0} = V_0 \sin \alpha \quad (1.27)$$

$$B = B_l \cos \alpha = \left(\frac{t}{n} - c \right) \cos \alpha = \frac{\pi D \left(1 - \frac{nc}{t} \right) \sin \alpha}{n} \quad (1.28)$$

n – numărul de spire (începuturi)

$$t = \pi D t g \alpha \quad (1.29)$$

$$z = L / \sin \alpha \quad (1.30)$$

$$\alpha = \arctg \frac{t}{\pi D} \quad (1.31)$$

$$B = \pi D \left(1 - \frac{c}{t} \right) \sin \alpha \quad (1.32)$$

7. Densitatea materialului se consideră constantă;
8. Curgerea este staționară;
9. Coeficientul de conductivitate termică a topiturii este constant;
10. Căldura specifică a topiturii este constantă;
11. Topitura se consideră un fluid vâscoelastic;
12. Legea puterii este valabilă;
13. Vâscozitatea nu depinde de presiune;
14. Se neglijează curgerea în jocul dintre spiră și cilindru;
15. Se neglijează influența spirei, ca și cum canalul ar fi infinit larg ($H \ll B$).

Cu simplificările (4) și (5) ecuația (1.23) este:

$$[\nabla \cdot \tau] = \nabla P \quad (1.33)$$

După cum rezultă din figura 1.8, curgerea topiturii prin canalul melcului este o rezultantă a curgerii în cele două direcții z și x, denumite

curgere longitudinală și, respectiv, transversală. Pe de altă parte, curgerea într-o singură direcție mai este denumită și curgere unidimensională.

Pentru început se vor deriva ecuațiile curgerii unidimensionale pentru fluide Newtoniene, apoi se vor obține ecuațiile curgerii bidimensionale, după care se va face o sinteză a distribuției vitezelor, rezultantei, iar în final se vor lua în considerare influențele vâscozității, a curburii canalului și curgerea în joc. Un tratament similar se va aplica fluidelor care respectă legea puterii.

1.6.4.1.3. Ecuațiile curgerii fluidelor Newtoniene

Să derivăm cea mai simplă formă a ecuației de curgere, anume ecuația curgerii unidimensionale a unui fluid Newtonian.

1.6.4.1.3.1. Curgerea unidimensională

Curgerea longitudinală

Dacă ne referim la sistemul format de canalul unui melc, cu sistemul de axe de referințe ca în figura 1.9, ecuația (1.33) devine, pentru curgerea unidimensională în direcția z :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \quad (1.34)$$

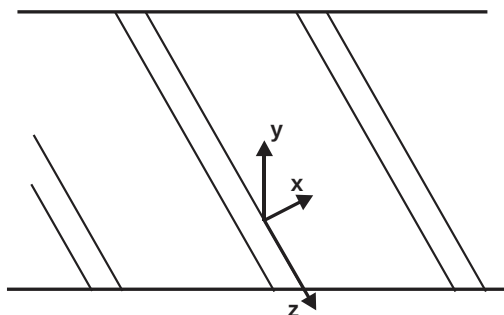


Figura 1.9. Sistemul de axe de referințe pentru canalul unui melc

Pentru fluidele Newtoniene avem:

$$\tau_{yz} = \eta \frac{\partial v_z}{\partial y} \quad (1.35)$$

și deci ecuația (1.34) devine:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \text{ sau } \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (1.36)$$

Integrând de două ori se obține soluția acestei ecuații în forma generală:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial y} &= \frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) y + C_1 \\ v_z &= \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) y^2 + C_1 y + C_2 \end{aligned} \quad (1.37)$$

Cele două constante se determină din condițiile limită:

$$c.l.1: y = 0, v_z = 0 \Rightarrow C_2 = 0$$

$$c.l.2: y = H, v_z = v_{z0} \Rightarrow v_{z0} = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) H^2 + C_1 H$$

$$C_1 = \frac{v_{z0}}{H} - \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) H \quad (1.38)$$

Deci expresia vitezei va fi:

$$v_z = \frac{y}{H} v_{z0} - \frac{y(H-y)}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (1.39)$$

Debitul de topitură pe direcție longitudinală este:

$$M_v = B \int_0^H v_z dy = B \int_0^H \left[\frac{y}{H} v_{z0} - \frac{y(H-y)}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] dy$$

$$M_v = B \int_0^H \frac{v_{z0}}{H} dy - B \int_0^H \frac{yH}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) dy + B \int_0^H \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) dy$$

$$M_v = \frac{B v_{z0} H}{2} - \frac{B H^3}{4\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{B H^3}{6\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

$$M_v = \frac{BHv_{z0}}{2} - \frac{BH^3}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (1.40)$$

Se vede că primul termen al debitului nu depinde de gradientul de presiune, deci este un debit de antrenare, încât avem:

$$M_v = M_{va} + M_{vp} \quad (1.41)$$

Semnul negativ din fața celui de al doilea termen semnifică faptul că debitul sub gradient de presiune se realizează în direcția negativă a acestuia.

Curgerea transversală

În mod similar cu curgerea longitudinală avem pe direcția x:

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (1.42)$$

Integrând se obține:

$$v_x = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) y^2 + C_1 y + C_2 \quad (1.43)$$

Cu condițiile la limită se determină constantele C_1 și C_2 :

$$\begin{cases} \text{c.l.1: } y = 0, v_x = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \\ \text{c.l.2: } y = H, v_x = -v_{x0} \Rightarrow C_1 = -\frac{v_{x0}}{H} - \frac{1}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) H \end{cases}$$

$$v_x = -v_{x0} \frac{y}{H} - \frac{y(H-y)}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (1.44)$$

Debitul pe direcția x este zero și vom avea:

$$M_{v_x} = B \int_0^H v_x dy = 0$$

$$\begin{aligned} \int_0^H -v_{x0} \frac{y}{H} dy - \int_0^H \frac{yH}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) dy + \int_0^H \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) dy &= 0 \\ -\frac{Hv_{x0}}{2} - \frac{H^3}{4\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{H^3}{6\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) &= 0 \end{aligned}$$

$$-\frac{H^3}{12\eta}\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) = +\frac{Hv_{x0}}{2} \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{6\eta v_{x0}}{H^2} \quad (1.45)$$

$$\begin{aligned} v_x &= -v_{x0} \frac{y}{H} - \frac{y}{2\eta} (H-y) \left(-\frac{6\eta v_{x0}}{H^2} \right) \\ v_x &= -v_{x0} \frac{y}{H} + 3v_{x0} \frac{y}{H} - 3v_{x0} \frac{y^2}{H^2} \\ v_x &= \frac{y}{H} v_{x0} \left(-3\frac{y}{H} + 2 \right) \end{aligned} \quad (1.46)$$

1.6.4.1.3.2. Curgerea bidimensională în direcția z

În acest caz ecuația (1.33) devine:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) \quad (1.47)$$

cu condițiile la limită:

$$\begin{aligned} c.l.1: x &= 0, v_z = 0 \\ c.l.2: x &= B, v_z = 0 \\ c.l.3: y &= 0, y = 0, v_z = 0 \\ c.l.4: y &= H, v_z = v_{z0} \end{aligned} \quad (1.48)$$

În aceste condiții soluția ecuației este:

$$\begin{aligned} v_z &= \frac{4v_{z0}}{\pi} \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} \frac{sh(i\pi y/B)}{ish(i\pi H/B)} \sin\left(\frac{i\pi x}{B}\right) - \frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \left[\frac{y^2}{2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{yH}{2} + \frac{4H^2}{\pi^3} \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} \frac{ch(i\pi/2H)(2x-B)}{i^3 ch(i\pi B/H)} \cdot \sin\left(\frac{i\pi y}{H}\right) \right] \end{aligned} \quad (1.49)$$

Debitul volumic se obține prin dublă integrare:

$$\begin{aligned} M_v &= \int_0^H \int_0^B v_z dy dz \\ M_v &= \frac{BHv_{z0}}{2} f_a - \frac{BH^3}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) f_p \end{aligned} \quad (1.50)$$

unde f_a și f_p sunt factorii de formă ai curgerii prin antrenare, respectiv, sub acțiunea gradientului de presiune.

$$f_a = \frac{16B}{\pi^3 H} \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} \operatorname{tgh} \frac{(i\pi H/2B)}{i^3} \quad (1.51)$$

$$f_p = 1 - \frac{192H}{\pi^5 B} \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} \operatorname{tgh} \frac{(i\pi H/2B)}{i^5} \quad (1.52)$$

Cei doi factori de formă ai curgerii sunt funcție de raportul H/B , după cum rezultă din figura 1.10. În figura 1.11 se dă o comparație între factorul de formă f_a teoretic și experimental, pentru trei polimeri, de unde se vede concordanță bună.

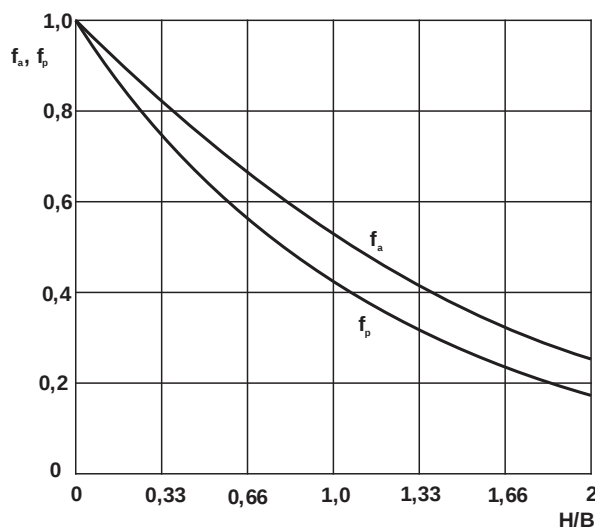


Figura 1.10. Variația factorilor de formă pentru cele două tipuri de curgeri cu raportul H/B

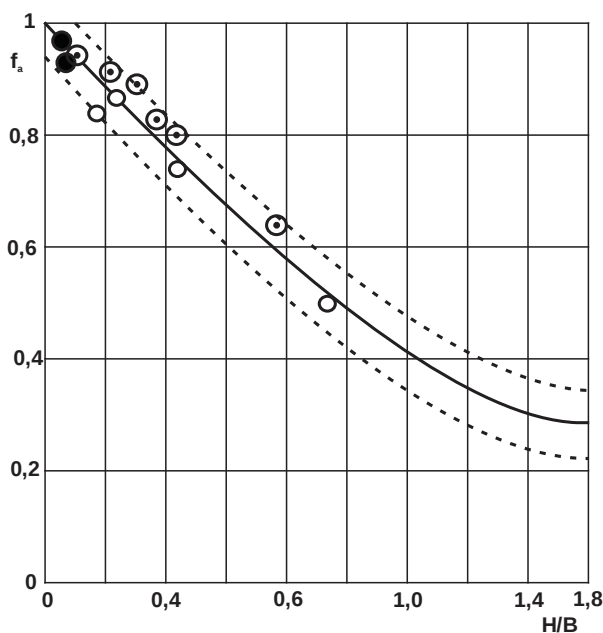


Figura 1.11. Variația factorului de formă f_a , teoretic și experimental pentru
 $\odot$ polizobutilenă, $\odot$ polizobutilenă, $\bullet$ polietilenă.

Pentru un număr de n canale paralele ecuația (1.50) devine:

$$M_v = \frac{nBHv_{z0}}{2} f_a - \frac{nBH^3}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) f_p \quad (1.53)$$

Dacă se utilizează ecuațiile (1.26) – (1.30) se obțin forme derivate ale ecuației debitului.

$$M_v = \frac{f_a n \pi DNBH \cos \alpha}{2} - \frac{f_p n BH^3 \sin \alpha}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \quad (1.54)$$

$$M_v = \frac{f_a n \pi DNH \left(\frac{t}{n} - c \right) \cos^2 \alpha}{2} - \frac{f_p n H^3 \left(\frac{t}{n} - c \right) \sin \alpha \cos \alpha}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \quad (1.55)$$

$$M_v = \frac{f_a \pi^2 D^2 N H \left(1 - \frac{n \cdot c}{t}\right) \sin \alpha \cos \alpha}{2} - \frac{f_p \pi D H^3 \left(1 - \frac{n \cdot c}{t}\right) \sin^2 \alpha}{12 \eta} \left(\frac{\partial p}{\partial l}\right) \quad (1.56)$$

Cele trei ecuații de mai sus pot fi scrise în forma:

$$M_v = f_a \cdot \alpha N - f_p \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial l}\right) \quad (1.57)$$

unde α , β , f_a și f_p depind numai de geometria melcului. Dacă se alege forma ecuației (1.56) avem:

$$\alpha = \frac{\pi^2 D^2 H \left(1 - \frac{n \cdot c}{t}\right) \sin \alpha \cos \alpha}{2} \quad (1.58)$$

$$\beta = \frac{\pi D H^3 \left(1 - \frac{n \cdot c}{t}\right) \sin^2 \alpha}{12} \quad (1.59).$$

1.6.4.1.3.3. Distribuția vitezelor

Dacă se introduc noile variabile:

$$\xi = \frac{y}{H}, a = \frac{-M_{vp}}{M_{va}} = \frac{B H^3 \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) \cdot 2}{12 \eta \cdot B H v_{z0}} = \frac{H^2}{6 \eta v_{z0}} \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) \quad (1.60)$$

atunci ecuațiile (1.39) și (1.44) devin:

$$\frac{v_z}{v_{z0}} = \xi (1 - 3a + 3a\xi) \quad (1.61)$$

$$\frac{v_x}{v_{x0}} = \xi (2 - 3\xi) \quad (1.62)$$

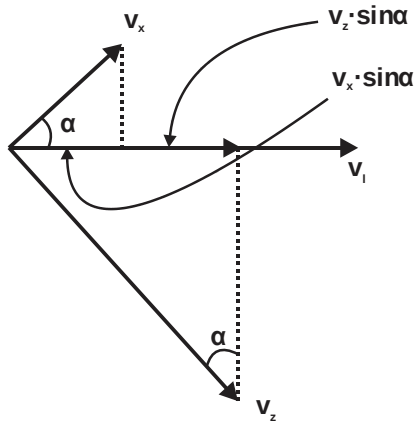


Figura 1.12. Reprezentarea grafică a vitezei

Viteza în direcția axei melcului este dată de ecuația:

$$v_l = v_z \sin \alpha + v_x \cos \alpha$$

adică:

$$v_l = v_{z0} \xi (1 - 3a + 3a\xi) \sin \alpha + v_{x0} \xi (2 - 3\xi)$$

$$v_l = v_0 \xi (1 - 3a + 3a\xi) \sin \alpha \cos \alpha + v_0 \xi (2 - 3\xi) \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\frac{v_l}{v_0} = \xi [3 - 3(\xi + a - a\xi)] \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\frac{v_l}{v_0} = 3\xi [1 - \xi - a(1 - \xi)] \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\frac{v_l}{v_0} = 3\xi [(1 - \xi)(1 - a)] \sin \alpha \cos \alpha \quad (1.63)$$

Se vede că v_x/v_{x0} nu depinde de raportul debitelor „a”.

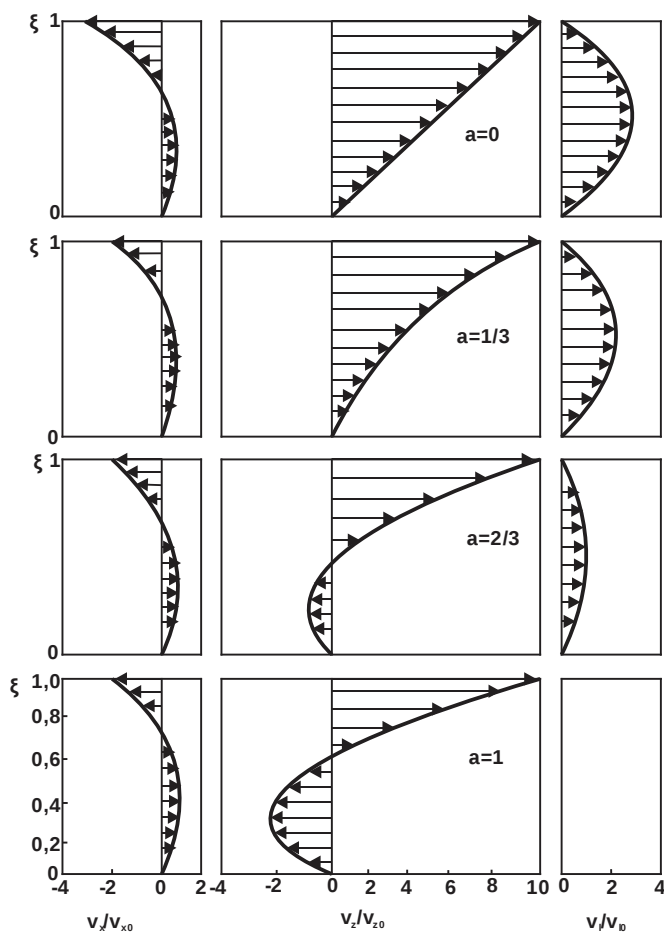


Figura 1.13. Distribuția vitezelor pentru diferite valori ale raportului „a”

Cu ajutorul curbelor de distribuție a celor trei comportamente ale vitezei topiturii, în canalul melcului, se poate trasa distribuția vitezei rezultantă, așa cum rezultă din figura 1.14, pentru cele două valori extreme ale raportului debitelor.

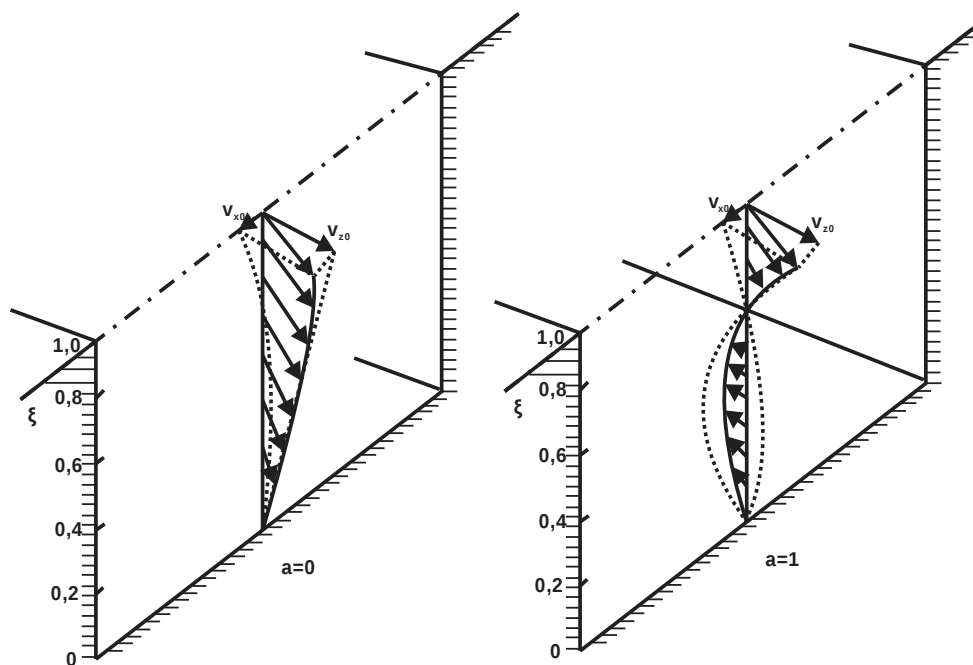


Figura 1.14. Distribuția vitezei rezultantă

Se poate determina distribuția vitezei topiturii și cu ajutorul ecuațiilor pentru curgerea bidimensională. Să analizăm această problemă pentru două cazuri: cilindru deschis și cilindru închis.

Cilindrul deschis

În această situație nu apare presiune în topitură și vom avea numai curgere prin antrenare. În acest caz se poate utiliza primul termen din membrul drept al ecuației (1.49) pentru a calcula distribuția vitezei, așa cum rezultă din figura 1.15.

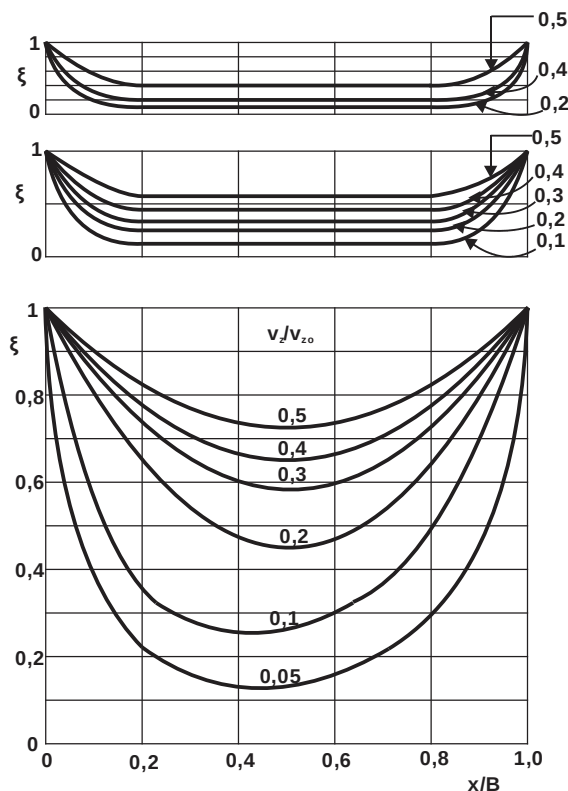


Figura 1.15. Distribuția vitezelor pe lățimea canalului în cazul cilindrului deschis

În partea de sus a figurii 1.15 este reprezentată distribuția pentru un canal puțin adânc, așa cum sunt cele în zonele de dozare – pompare a melcilor pentru mase plastice. În mijloc este o distribuție pentru o zonă de plastifiere, iar în partea inferioară un caz neobișnuit în prelucrarea maselor plastice, dar întâlnit la prelucrarea cauciucului.

Din figura 1.15 se poate aprecia influența raportului H/D asupra factorului de formă a curgerii prin antrenare. Fluidul din colțuri spre miezul melcului este aproape stragnat și dacă acesta este un polimer sensibil la căldură, acesta va crea mari neajunsuri.

Cilindrul închis

În aceste condiții, debitul este nul și deci:

$$M_{va} + M_{vp} = 0, \text{ sau}$$

$$\frac{1}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{6v_{z0}}{H^2} \left(\frac{f_a}{f_p} \right) \quad (1.64)$$

Combinând ecuația (1.64) cu (1.49) se poate obține expresia pentru viteza locală datorită presiunii la cilindrul închis.

Viteza netă (locală) este dată de suma acestei viteze indusă de presiune și viteza prin antrenare din ecuația (1.49). Se obține:

$$\begin{aligned} \frac{v_z}{v_{z0}} = & \frac{4}{\pi} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i} \frac{\sinh i\pi(y/B)}{\sinh i\pi(H/B)} \sin i\pi(x/B) + \\ & + \frac{f_a}{f_p} \left\{ \frac{3y}{H^2} (y-H) + \frac{2\eta}{\pi^3} \sum_{i=1,3,\dots} \frac{1}{i^3} \frac{\cosh \left[\frac{i\pi(2x-B)}{2H} \right]}{\cosh \left[\frac{i\pi}{2(H/B)} \right]} \sin i\pi(H/B) \right\} \quad (1.65) \end{aligned}$$

În figura 1.16 se dă o distribuție tipică într-un plan perpendicular pe axa z. Din nou atragem atenția că nu există un debit net în lungul canalului spre gura de alimentare.

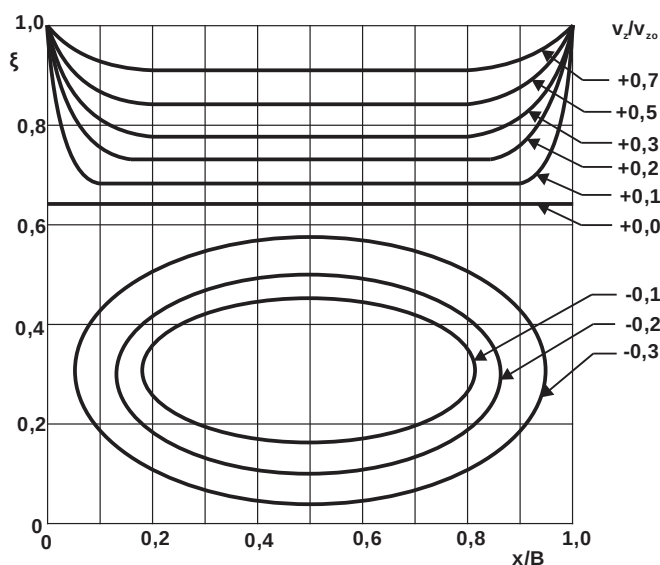


Figura 1.16. Distribuția vitezei în lungul canalului în cazul cilindrului închis

1.6.4.1.3.5. Variația vâscozității pe adâncimea canalului

În toate analizele de până acum s-a considerat că vâscozitatea este constantă pe secțiunea canalului melcului. După cum se știe însă mașinile de extrudare sunt prevăzute cu sisteme de încălzire sau răcire astfel încât este de așteptat ca pe adâncimea canalului să existe un gradient de temperatură care modifică vâscozitatea topiturii. În afară de aceasta, după cum am văzut la distribuția vitezelor există și o variație a gradientului de deformare pe adâncimea canalului (derivata vitezei în raport cu adâncimea) care de asemenea influențează vâscozitatea topiturii de polimer.

În cele ce urmează se prezintă o analiză a influenței vâscozității presupunând o variație liniară a acesteia cu adâncimea canalului.

Dacă se neglijează curgerea transversală, adică dacă se consideră numai curgerea unidimensională, în lungul canalului, ecuația de conservare a impulsului devine:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (1.66)$$

unde η este o funcție de adâncimea canalului, adică:

$$\eta = f(y) \quad (1.67)$$

Dacă se presupune o variație liniară a lui η cu y , integrarea ecuației (1.66) rezultă în expresia vitezei:

$$v_z = \frac{v_{z0}}{\ln \gamma} \ln \left[1 - \frac{y}{H} (1 - \gamma) \right] - \frac{yH}{\eta_m - \eta_c} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{H^2}{(\eta_m - \eta_c) \ln \gamma} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \ln \left[1 - \frac{y}{H} (1 - \gamma) \right] \quad (1.68)$$

unde:

η_c – vâscozitatea fluidului la peretele cilindrului;

η_m – vâscozitatea fluidului la miezul melcului;

$$\gamma = \frac{\eta_c}{\eta_m}$$

Debitul de topitură se poate obține integrând (1.68) pe lățimea canalului (secțiunea canalului).

$$M_v = B \int_0^H v_z dy = f_{\eta a} \alpha N - f_{\eta p} \left(\frac{\beta}{\bar{\eta}} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \quad (1.69)$$

unde $\bar{\eta}$ este vâscozitatea medie.

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_c + \eta_m}{2} \quad (1.70)$$

Termenii $f_{\eta a}$ și $f_{\eta p}$ sunt factori pentru influența vâscozității asupra curgerii prin antrenare și sub influența presiunii. Acești factori sunt numai funcție de γ și sunt exprimați prin:

$$f_{\eta a} = 2 \left[\frac{\gamma}{\gamma - 1} - \frac{1}{\ln \gamma} \right] \quad (1.71)$$

$$f_{\eta p} = \frac{3(1+\gamma)}{1-\gamma} \left[1 - 2 \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} - \frac{1}{\ln \gamma} \right) \right] = \frac{3(1+\gamma)}{1-\gamma} [1 - f_{\eta a}] \quad (1.72)$$

În figura 1.17 este dată variația celor doi factori cu raportul vâscozităților.

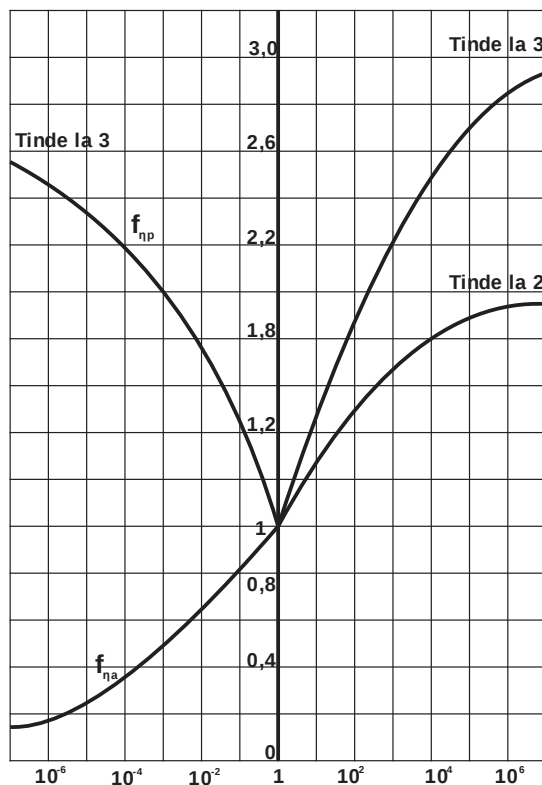


Figura 1.17. Variația factorilor $f_{\eta a}$ și $f_{\eta p}$ cu variația raportului η_c/η_m

După cum se vede din figura 1.17, când raportul vâscozităților este 1, ambii factori sunt egali cu unitatea, iar ecuația (1.69) se reduce la cea găsită în condițiile în care vâscozitatea nu variază pe adâncimea canalului. Dacă melcul este răcit, deci când vâscozitatea din jurul miezului melcului este mai mare și raportul $\gamma < 1$, debitul prin antrenare scade. Invers, când melcul este încălzit, debitul prin antrenare crește până la o valoare limită,

care este dublul debitului pentru $\gamma = 1$. În lipsa debitului sub acțiunea gradientului de presiune, situația de mai sus corespunde cu o alunecare totală a fluidului peste suprafața melcului.

Debitul sub acțiunea gradientului de presiune crește pe măsură ce raportul γ deviază de la unitate. Prin răcirea melcului se realizează o reducere a capacității de pompare pentru o viteză dată a acestuia, deoarece vâscozitatea medie $\bar{\eta}$ nu poate să crească prea mult. Încălzirea melcului poate să reducă sau să mărească debitul net, în funcție de valoarea relativă a celor două debite. Încălzirea melcului are ca efect în general creșterea debitului pentru o viteză dată a acestuia.

1.6.4.1.3.6. Curgerea prin canalul parțial gol

Această problemă prezintă interes pentru cazul melcilor prevăzuți cu secțiune pentru degazare. Datorită faptului că topitura nu umple toată secțiunea canalului ($\partial p / \partial z = 0$), astfel încât debitul de topitură într-un astfel de canal este dat numai de debitul prin antrenare:

$$M_v = M_{va} = f_a a N \quad (1.73)$$

unde α este la fel ca mai înainte, depinzând numai de geometria canalului, iar factorul de formă f_a explică atât influența curgerii bidimensionale, cât și influența raportului sau gradului de umplere a canalului cu fluid:

$$f_a = \frac{32 f^2}{\pi^3 (H/B)} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^3} \operatorname{tgh} \left[\frac{i\pi H/B}{4 f} \right] \quad (1.74)$$

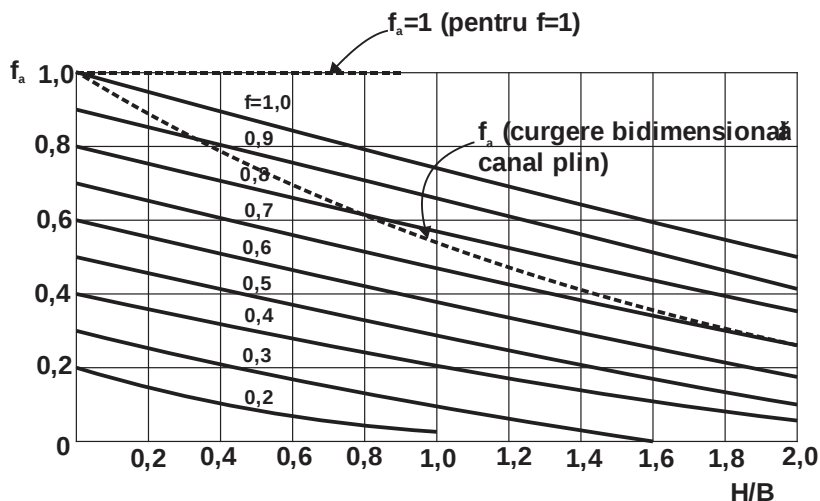


Figura 1.18. Variația factorului de formă cu raportul H/B pentru canalul parțial gol, în comparație cu situația canalului plin (linie întreruptă)

Figura 1.18 evidențiază o situație foarte interesantă. Se vede că pe măsură ce crește coeficientul de umplere a canalului se înregistrează o creștere a debitului. Când coeficientul f atinge valoarea 1 însă, topitura umple complet canalul și udă flancurile filetului, iar capacitatea de pompare scade brusc la cea pentru cazul canalului plin în cazul modelului bidimensional (vezi figura 1.10). Situația de mai sus explică și instabilitatea debitului unui melc care este prevăzut cu o secțiune parțial goală. Variația debitului se produce între curba pentru $f = 1$ și cea pentru curgerea bidimensională, canal plin (întreruptă). Se vede că instabilitatea este cu atât mai mare cu cât este mai mare raportul H/B .

1.6.4.1.3.7. Influența curburii canalului

În toate ecuațiile deduse mai înainte am presupus valabil modelul suprafeței plate sau a unghiului de înclinare a filetului constant. De notat

însă că unghiul filetului depinde de diametrul la care se apreciază, după relația:

$$\alpha = \arctg \frac{t}{\pi D} \quad (1.75)$$

În literatură s-au utilizat diametrul melcului, media aritmetică și mai puțin diametrul miezului melcului. Se poate introduce un factor de corecție pentru curbura canalului, care, așa cum se va vedea, este aproape de unitate, dacă ecuațiile se bazează pe diametrul melcului (crestei acestuia).

Dacă unghiul de înclinare al filetului este unic, mișcarea fluidului între doi cilindri concentrici antrenati în mișcare de rotație aproximează curgerea prin antrenare în lungul canalului, fiind reprezentată în figura 1.19.

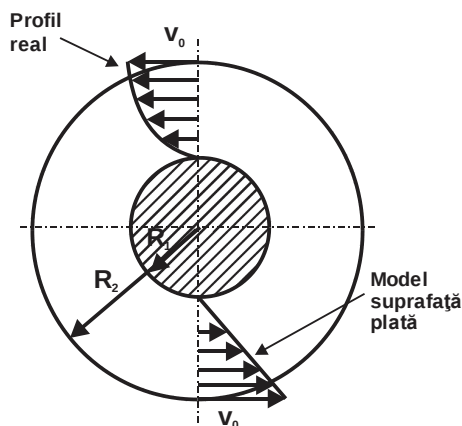


Figura 1.19. Mișcarea fluidului între doi cilindri concentrici antrenati în mișcare de rotație

Pentru un fluid Newtonian, viteza la o adâncime dată este descrisă de ecuația:

$$v_z = 2\pi Nr \left[\frac{1 - \left(\frac{R_1}{r}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2} \right] \cos \alpha \quad (1.76)$$

Dacă se neglijează efectul flancurilor filetului, integrarea ecuației (1.76) pe secțiunea canalului conduce la ecuația debitului:

$$M_v = f_{ca} \alpha N \quad (1.77)$$

cu α definit ca mai înainte, unde f_{ca} este un factor de influență a curburii canalului și care este dat de expresia:

$$f_{ca} = \frac{1}{2\left(\frac{H}{D}\right)} - \frac{\ln \left[\frac{1}{1 - 2(H/D)} \right]}{\left(\frac{H}{D}\right) \left[\left(\frac{1}{1 - 2(H/D)} \right)^2 - 1 \right]} \quad (1.78)$$

unde D este diametrul exterior sau diametrul interior al cilindrului. Se vede că factorul f_{ca} depinde numai de raportul H/D , așa cum se vede și din figura 1.20.

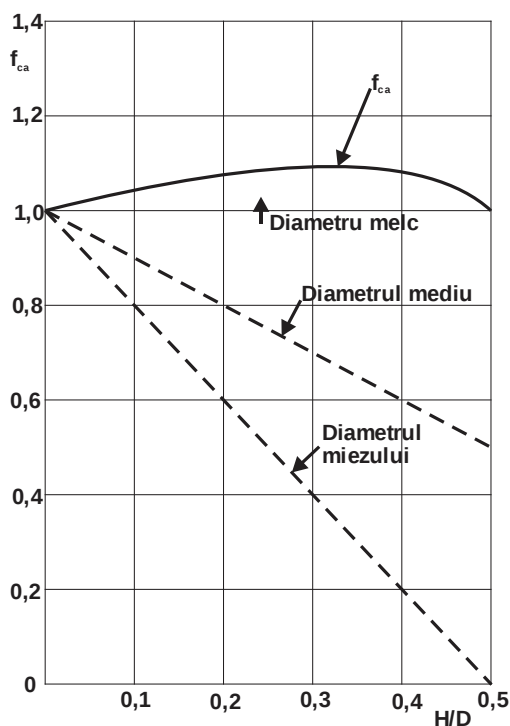


Figura 1.20. Variația factorului de influență a curburii cu raportul H/D

După cum se vede din figura de mai sus, dacă se ia în considerare curbura canalului variația debitului nu este mai mare de aproximativ 10%, ceea ce justifică neglijarea acestei influențe. Aceasta cu atât mai mult cu cât unghiul de înclinare al filetului este mai mic de 20° . Se pare că în literatură nu s-a introdus încă un factor de corecție a influenței curburii pentru debitul sub acțiunea gradientului de presiune.

1.6.4.1.3.8. Curgerea în jocul dintre spire și cilindru

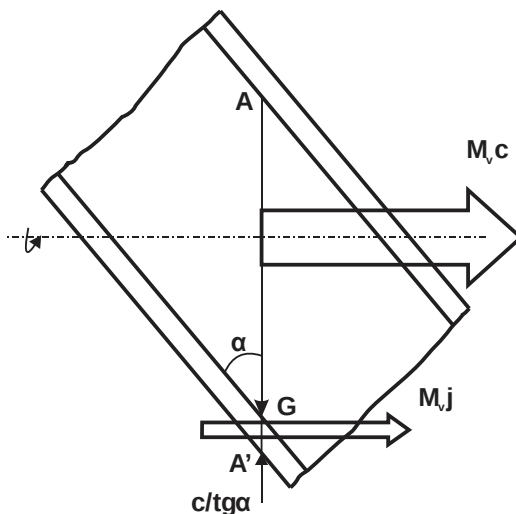


Figura 1.21. Curgerea în jocul dintre spire și cilindru

Curgerea în joc în direcție axială poate fi imaginată ca o curgere sub acțiunea gradientului de presiune $(\partial p / \partial l)_j$ printr-o secțiune de adâncime δ și lățime $nc/\text{tg}\alpha$, unde n sunt numărul de spire ale melcului. Deci avem:

$$M_{vj} = \frac{B_j H_j^3}{12\eta_j} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right)_j \quad (1.79)$$

$$M_{vj} = \frac{(nc/\text{tg}\alpha) \delta^3}{12\eta_j} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right)_j \quad (1.80)$$

Mohr și Mallouk au arătat că gradientul de presiune în joc este:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial l} \right)_j = \frac{-6\eta\pi DN \cos \alpha}{H^2} \left[a \left(\frac{\pi D \cos \alpha}{nc} + \sin \alpha \right) + \frac{B_l \cdot a_j \sin \alpha}{c} \right] \quad (1.81)$$

unde a_j este un raport al debitelor în joc, similar raportului a .

$$a_j = \frac{H^2}{6v_{x0}\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (1.82)$$

Mohr și Mallouk au arătat că a_J este dat de expresia:

$$a_J = \frac{(1-I) - \frac{[I^3(\eta/\eta_J)\pi Da]}{nctg\alpha}}{1 + \frac{[I^3(\eta/\eta_J)B]}{c \cdot \cos\alpha}} \quad (1.83)$$

unde: $I = \frac{\delta}{H_0}$

Deoarece I este mult mai mic ca 1, ecuația (1.83) poate fi aproximată prin:

$$a_J = 1 - I \quad (1.84)$$

Ecuatiile (1.80) și (1.81) conduc la:

$$M_{vJ} = \frac{-n\delta^3\pi DN \cos^2\alpha}{2H^2} \left(\frac{\eta}{\eta_J} \right) \left[B_l \cdot a_J + a \left(\frac{\pi D}{ntg\alpha} + c \right) \right] \quad (1.85)$$

Debitul prin canal în direcția axială, adică pe secțiunea AG, este dat de:

$$M_{v_c} = \int_0^A (v_z \sin\alpha + v_x \cos\alpha) dA \quad (1.86)$$

unde $dA = \frac{B}{\sin\alpha} dy$

Dacă considerăm vitezele (cu $M_{xJ} \neq 0$):

$$v_z = v_{z0} \left[(1-3a) \frac{y}{H} + 3a \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \quad (1.86)$$

$$v_x = v_{x0} \left[(1-3a_J) \frac{y}{H} + 3a_J \left(\frac{y}{H} \right)^2 \right] \quad (1.86')$$

se obține debitul:

$$M_{v_c} = \frac{nv_{z0}BH}{2} (1-a) + \frac{nv_{x0}BH}{2tg\alpha} (1-a_J) \quad (1.87)$$

După cum se vede, primul termen din ecuația de mai sus este chiar ecuația curgerii în formă unidimensională prin canalul melcului. Aceasta devine cu ajutorul ecuației (1.84):

$$M_{v_c} = \frac{\pi^2 D^2 NH \left(1 - \frac{nc}{t}\right) \sin \alpha \cos \alpha}{2} (1 - a - I) \quad (1.88)$$

Debitul net al extruderului va fi deci:

$$M_v = M_{v_c} + M_{v_j} = \frac{\pi^2 D^2 NH \left(1 - \frac{nc}{t}\right) \sin \alpha \cos \alpha}{2} (1 - a - I) - \frac{n\delta^3 \pi DN \cos^2 \alpha \left(\frac{\eta}{\eta_j}\right) \left[B_l \cdot a_j + a \left(\frac{\pi D}{ntg\alpha} + c \right) \right]}{2H^2} \quad (1.89)$$

Termenul al doilea din ecuația (1.89) este mult mai mic decât primul și poate fi neglijat. Efectul jocului constă deci în reducerea debitului în direcția axială, datorită mărimii $I > 0$, din primul termen în ecuația (1.89).

Gore și McKelvey au propus următorul factor de corecție pentru debitul sub acțiunea gradientului de presiune, pentru a ține seama de curgerea în joc:

$$f_{jp} = \left[1 + \left(\frac{\delta}{H_0} \right)^3 \left(\frac{B}{b} \right) \left(\frac{1}{\sin \alpha \cos \varepsilon} \right)^2 \right] \quad (1.90)$$

$$\text{deci debitul va fi: } M_v = M_{va} + M_{vp} \cdot f_{\xi p} \quad (1.91)$$

1.6.4.1.3.9. Puterea necesară pentru acționarea melcului

În principiu, există două metode pentru calculul puterii necesare pentru acționarea melcului:

1. În funcție de vâscozitatea fluidului care curge prin canalul melcului. Cu aceasta se calculează tensiunea de forfecare la contactul cu cilindrul, după care se integrează această tensiune pe toată suprafața de contact cu topitura, atât în canal cât și în joc. Această metodă este

folosită mai ale de McKelvey, fiind un bilanț al forțelor care acționează la contactul dintre topitură și cilindrul considerat în rotație. Rezultatele obținute pot fi utilizate în deducerea ecuațiilor de operate, după cum vom vedea mai departe.

2. Puterea de acționare mai poate fi calculată și ca o sumă de puteri disipate ca energie vâscoasă și ca energie necesară pentru creșterea presiunii topiturii din canalul melcului. Bernhardt¹ consideră această metodă mai mult legată de intimitatea comportării sistemului topiturii de polimer în mașina de extrudere.

În cele ce urmează se vor prezenta ambele metode. Prima pentru înțelegerea ecuațiilor de operare, iar a doua pentru scopul întocmirii bilanțurilor termice la mașinile de extrudere.

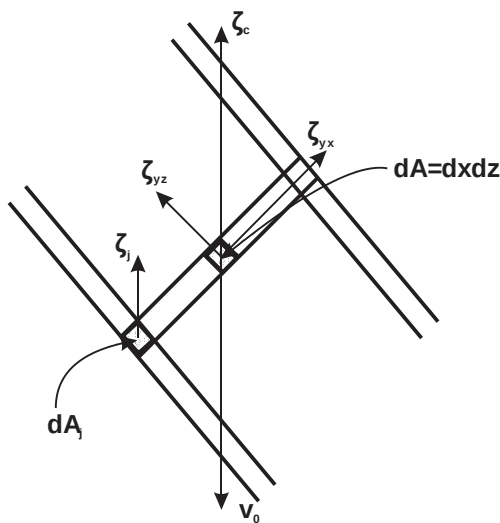


Figura 1.22. Curgerea prin canalul melcului

Pe suprafața elementară dA acționează o forță de forfecare dF . Puterea necesară pentru învingerea acestei forțe în condițiile deplasării cilindrului cu viteza v_0 este:

¹ Bernhardt, E. C., Processing of Thermoplastic Materials

$$dP = dP_c + dP_j$$

$$dP_c = v_0 \cdot dF = v_0 \cdot \tau_c \cdot dA \quad (1.92)$$

$$dP_c = -v_{x0} \cdot dF_x + v_{z0} \cdot dF_z \quad (1.93)$$

$$dF_x = \tau_{yx} \cdot dA \quad (1.94)$$

$$dF_z = \tau_{yz} \cdot dA \quad (1.95)$$

$$dP_c = (-v_{x0}\tau_{yx} + v_{z0}\tau_{yz})dA \quad (1.96)$$

$$P_c = \int_0^A (-v_{x0}\tau_{yx} + v_{z0}\tau_{yz})dA \quad (1.97)$$

$$dA = dx \cdot dz \quad (1.98)$$

$$P_c = \int_0^z \int_0^B (-v_{x0}\tau_{yx} + v_{z0}\tau_{yz})dx dz \quad (1.99)$$

Tensiunile de forfecare la suprafața cilindrului pentru un fluid Newtonian sunt:

$$\tau_{yx} = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)_{y=H} ; \tau_{yz} = \eta \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{y=H} \quad (1.100)$$

Derivând ecuațiile vitezelor în raport cu y și înlocuind în ecuația (1.100) se obține:

$$P_c = \int_0^z \int_0^B \left[\frac{4\eta v_{x0}^2}{H} + \frac{\eta v_{z0}^2}{H} + \frac{v_{z0}H}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] dx dz \quad (1.101)$$

Puterea consumată pentru învingerea rezistențelor în joc este:

$$dP_j = v_0 \cdot dF_j = v_0 \tau_j dA_j \quad (1.102)$$

$$\tau_j = \eta \dot{\gamma}_j = \eta \frac{v_0}{\delta} \quad (1.103)$$

$$dP_j = \frac{v_0^2}{\delta} \eta dA_j \quad (1.104)$$

$$P_j = \frac{v_0}{\delta} \int_0^z \int_0^b \eta dx dz \quad (1.105)$$

Dat fiind faptul că B și b nu depind de z , avem:

$$P = P_c + P_j = nB \int_0^z \left[\frac{4\eta v_{x0}^2}{H} + \frac{\eta v_{z0}^2}{H} + \frac{v_{z0}}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] dz + n v_0^2 \frac{b}{\delta} \int_0^7 \eta dz \quad (1.106)$$

Pentru un canal cu geometrie constantă avem:

$$P = k_E \eta N^2 Z + \alpha \cdot N \cdot \Delta P \quad (1.107)$$

unde:

$$k_E = \frac{\pi^3 D^3 \sin \alpha}{H} \left[1 + 3 \sin^2 \alpha + \frac{bH}{\delta B} \right] \left[1 - \frac{2\delta}{D} - \frac{nb}{\pi D \sin \alpha} \right] \quad (1.108)$$

După cea de a doua metodă, puterea totală necesară unui volum diferențial de topitură este:

$$dP = dP_c + dP_p + dP_j \quad (1.109)$$

$$dP = \psi_c dV_c + dP_p + \psi_j dV_j \quad (1.110)$$

unde:

$\psi_c dV_c$ – puterea disipată sub formă de căldură în canalul melcului (energie de forfecare vâscoasă);

dP_p – puterea necesară pentru ridicarea presiunii fluidului;

$\psi_j dV_j$ – puterea disipată sub formă de căldură în jocul dintre spire și cilindru;

ψ – funcții de disipare a energiei vâscoase.

Să calculăm pe rând termenii din ecuația (1.110).

Funcția de disipare ψ se calculează din ecuația energiei, după introducerea simplificărilor:

$$\psi_c = \eta \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (1.111)$$

Volumul elementelor de topitură din canale este:

$$dV_c = nB dy dz \quad (1.112)$$

și deci:

$$dP_c = \eta \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right] n B dy dz \quad (1.113)$$

Prin diferențierea ecuațiilor vitezelor se obține:

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{2v_{x0}}{H} \left[3 \left(\frac{y}{H} \right) - 1 \right] \quad (1.114)$$

și

$$\frac{\partial v_z}{\partial y} = \frac{v_{z0}}{H} \left[1 - 3a \left(1 + 2 \frac{y}{H} \right) \right] \quad (1.115)$$

Utilizând și substituțiile:

$$v_{z0} = v_0 \cos \alpha \quad (1.126)$$

$$v_{x0} = v_0 \cdot \sin \alpha \quad (1.127)$$

$$B = \frac{\pi D \left(1 - \frac{nc}{t} \right) \sin \alpha}{n} \quad (1.128)$$

$$dz = \frac{dl}{\sin \alpha} \quad (1.130)$$

și integrând ecuația (1.113) după y între limitele 0 și H se obține:

$$dP_c = \frac{\pi^3 D^3 N^2 \eta \left(1 - \frac{nc}{t} \right)}{H} \left[(1 + 3a^2) \cos^2 + 4 \sin^2 \alpha \right] dl \quad (1.116)$$

Puterea necesară pentru a ridica presiunea topiturii este:

$$dP_p = M_v \cdot dp \quad (1.117)$$

Puterea disipată în joc va fi:

$$dP_J = \psi_J dV_J = \eta_J \left(\frac{\partial V_J}{\partial y} \right)^2 n \cdot \delta \cdot c \cdot \cos \alpha dz \quad (1.118)$$

$$dP_J = \frac{nV_0^2 \cdot c \cdot \cos \alpha \cdot \eta_J}{\delta} dz = \frac{nV_0^2 b}{\delta} \eta_J dz \quad (1.119)$$

Se observă că ecuația (1.119) este aceeași cu termenul al doilea din ecuația (1.116), deci cele două metode sunt echivalente.

Deoarece $V_0 = \pi DN$ și $dz = \frac{dl}{\sin \alpha}$ avem:

$$dP_j = \frac{n\pi^2 D^2 N^2 \eta_j c}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} dl \quad (1.120)$$

Puterea totală pentru acționarea melcului este:

$$dP = \frac{\pi^3 D^3 N^2 \eta \left(1 - \frac{nc}{t}\right)}{H} \left[(1 + 3a^2) \cos^2 \alpha + 4 \sin^2 \alpha \right] dl + \quad (1.121)$$

$$+ M_v dp + \frac{n\pi^2 D^2 N^2 \eta_j c}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} dl$$

unde primul și ultimul termen reprezintă puterea transferată topiturii pentru a ridica temperatura acesteia.

Dacă considerăm raportul debitelor „a”: $a = -\frac{M_{vp}}{M_{va}} = \frac{H^2}{6\eta v_{z0}} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)$ și

$$v_{z0} = v_0 \cos \alpha = \pi DN \cos \alpha, \text{ iar } dz = \frac{dl}{\sin \alpha}, \quad dp = \frac{6\pi DN \eta a}{H^2 \operatorname{tg} \alpha} dl \quad (1.122),$$

împreună cu $M_v = M_{va}(1-a)$ (1.123), unde $M_{va}(1-a)$ se ia primul termen din ecuația (1.56) cu $f_a = 1$, se obține următoarea formă a ecuației (1.121):

$$dP = \frac{\pi^3 D^3 N^2 \eta \left(1 - \frac{nc}{t}\right)}{H} \left[(1 + 3a) \cos^2 \alpha + 4 \sin^2 \alpha \right] dl + \quad (1.124)$$

$$+ \frac{n \cdot \pi^2 D^2 N^2 \eta_j \cdot c}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} dl$$

sau

$$dP = \frac{\pi^3 D^3 N^2 \eta \left(1 - \frac{nc}{t}\right)}{H} \left[1 + 3 \sin^2 \alpha\right] dl + M_{va} dp + \frac{n\pi^2 D^2 N^2 \eta_J c}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} dl \quad (1.125)$$

Mohr și Mollouk⁵ au extins analiza de mai sus pentru a include situația când avem și curgere în joc ($a_J \neq 1$).

$$dP = \frac{\pi^3 D^3 N^2 \eta \left(1 - \frac{nc}{t}\right)}{H} \left[(1 + 3a) \cos^2 \alpha + (4 - 3I) \sin^2 \alpha\right] dl + \frac{n\pi^2 D^2 N^2 \eta_J c}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left\{1 + 3I^2 (\eta/\eta_J) \left(\frac{a \cos^2 \alpha - \pi Da \sin \alpha \cos \alpha}{n \cdot c}\right) - \left[\frac{\pi Da_J \left(1 - \frac{nc}{t}\right) \sin^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha}{n \cdot c}\right]\right\} dl \quad (1.126)$$

unde $I = \delta/H$.

Dacă jocul este mic, așa cum este de obicei, I poate fi considerat zero și ecuația (1.126) devine identică cu (1.124), în care s-a neglijat curgerea în joc.

Toată analiza de mai sus s-a bazat pe ipoteza neglijării influenței adâncimii canalului (canale cu adâncime foarte mică).

Gore și McKelvey au găsit o formă modificată a ecuației (1.125) în care se ține seama de efectul fețelor spirelor:

$$dP = \frac{\pi^3 D^3 N^2 \eta \left(1 - \frac{nc}{t}\right)}{H} \left(F_p \cos^2 \alpha + 4 \sin^2 \alpha\right) dl + M_{va} dp + \frac{n\pi^2 D^2 N^2 \eta_J c}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} dl \quad (1.127)$$

în care F_p este un factor care depinde numai de raportul H/B , așa cum se vede din figura (1.23).

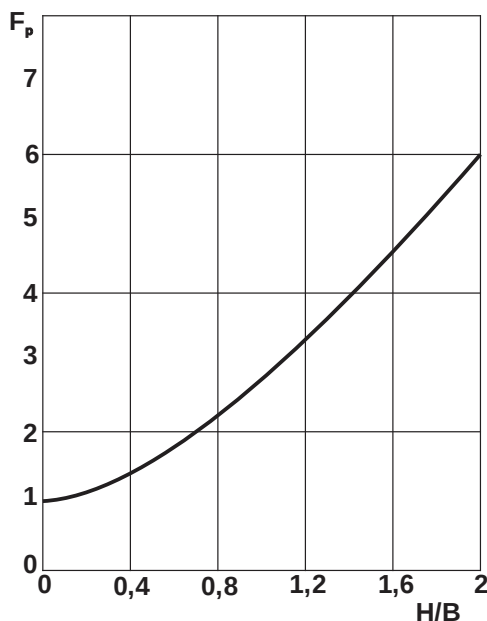


Figura 1.23. Dependența factorului F_p de raportul H/B

După cum se vede, ecuația (1.127) devine ecuația (1.125) când $F_p=1$, adică atunci când se neglijează influența fețelor spirelor.

1.6.4.1.3.10. Sumar al ecuațiilor curgerii

Până aici au fost deduse ecuațiile curgerii pentru diferite condiții la limită, diferite vâscozități ale topiturii sau pentru anumite geometrii ale canalului. Toate complicațiile care au apărut au fost „ocolite” prin introducerea unor factori de formă și constante depinzând de geometria canalului în general. În continuare sunt prezentate ecuațiile curgerii în forma cea mai generală, introducându-se factorii potriviți pentru toate influențele mai importante.

Așa cum s-a văzut, ecuația curgerii topiturii poate fi scrisă în forma:

$$M_v = M_{va} + M_{vp} = f'_a a N - f'_p \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \quad (1.128)$$

în care diferiți factori de formă sau influențe au fost combinați liniar:

$$f'_a = f_a \cdot f_{\eta a} \cdot f_{ca} \quad (1.129)$$

$$f'_p = f_p \cdot f_{\eta p} \quad (1.130)$$

După cum se vede, încă nu a fost derivat un factor f_{cp} care să țină seama de influența curburii canalului asupra debitului sub acțiunea gradientului de presiune.

În ecuațiile de mai sus avem:

- α și β sunt constantele geometrice ale melcului definite prin ecuațiile (1.58) și (1.59);
- N – turația melcului;
- η – vâscozitatea în secțiune transversală a canalului melcului;
- $\partial p / \partial l$ este gradientul de presiune pe direcția axială a melcului;
- f_a și f_p sunt factori de formă pentru curgerea prin antrenare și sub acțiunea gradientului de presiune;
- $f_{\eta a}$ și $f_{\eta p}$ explică variația vâscozității cu adâncimea canalului, fiind prevăzuți în figura (1.17);
- f_{ca} și f_{cp} explică influența curburii canalului, variația factorului f_{ca} este prezentată în figura (1.20).

1.6.4.2. Ecuațiile de operare ale extruderului

Ecuațiile curgerii topiturii prin canalul melcului mașinii de extrudare sunt ecuațiile diferențiale în raport cu lungimea canalului sau a melcului. Ele reflectă comportarea locală a procesului și dau informații despre distribuția vitezelor, debitul, consumul de energie, etc..

Pentru a determina performanțele mașinii de extrudare este necesar să se integreze aceste ecuații, obținându-se așa numitele ecuații de operare ale mașinii de extrudare.

Dacă utilizăm ecuația curgerii, în forma cea mai generală, ecuația (1.128), avem:

$$M_v = f'_a \alpha N - f'_p \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \quad (1.131)$$

sau într-o formă echivalentă:

$$M_v = k_a N - \frac{k_p}{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \quad (1.132)$$

unde k_a și k_p sunt niște constante de debit pentru cele două tipuri de curgere. Din ultima ecuație se obține:

$$\Delta P = \int_0^L \frac{k_a N - M_v}{k_p} \eta dz \quad (1.133)$$

Cu ajutorul ecuației (1.133) se poate determina căderea de presiune realizată de cuplul cilindru – melc, deci unul din parametrii procesului de extrudare. Pentru a rezolva integrala însă este necesar să se adopte legea de variație a vâscozității cu lungimea canalului. Există, în principiu, două moduri de operare a unui extruder:

- operare izotermă;
- operare adiabatică.

1.6.4.2.1. Operarea izotermă

În acest caz se consideră că temperatura este constantă pe toată lungimea canalului și deci și vâscozitatea topiturii este constantă. Pentru cazul melcului cu geometrie constantă, sau fără compresie, $\partial p / \partial z = \Delta p / z$, iar ecuația curgerii (1.132) sau caracteristica melcului devine:

$$M_v = k_a N - \frac{k_p}{\eta} \frac{\Delta p}{z} \quad (1.134)$$

În mod similar avem caracteristica filierei:

$$M_{vf} = \frac{k_f}{\eta_f} \Delta p = \frac{\Delta p}{R_f} \quad (1.135)$$

unde η_f este vâscozitatea topiturii de polimer în filieră.

Se vede că ambele caracteristici sunt drepte la intersecția cărora se determină punctul de operare al extruderului, așa cum sunt punctele A, B, C, în figura (1.24).

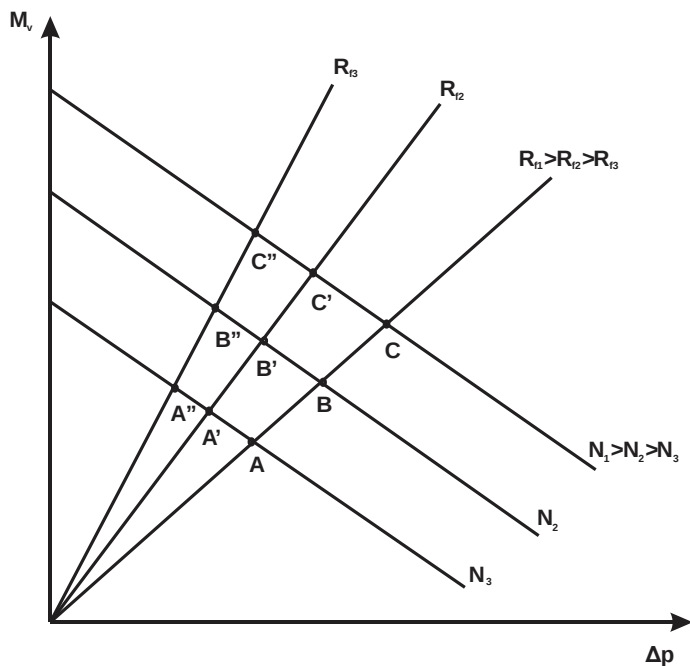


Figura 1.24. Caracteristicile melcului și filierei în cazul operării izoterme a unui extruder

Dacă fluidul are comportare Newtoniană, adică:

$$\eta = \eta_f \quad (1.136)$$

din ecuațiile (1.134) și (1.135) se pot determina condițiile de operare:

$$\Delta p = \frac{k_a \eta}{k_f + \frac{k_p}{z}} N \quad (1.137)$$

$$M_v = \frac{k_a k_f}{k_f + \frac{k_p}{z}} \cdot N \quad (1.138)$$

Se vede deci că variabila cea mai importantă pentru parametrii procesului este turația melcului.

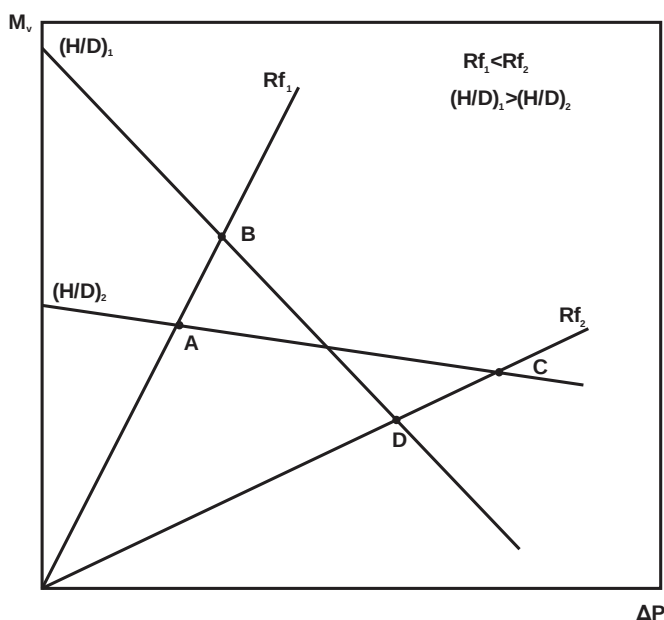


Figura 1.25. Caracteristicile melcului și filierei pentru două tipuri de melci și două rezistențe la filieră

După cum se observă din figura (1.25), în cazul unei filiere cu rezistență mică (cu secțiune de curgere mare) trecerea de la un melc cu adâncime mică a canalului la unul cu adâncime mare determină o creștere a debitului (A→B). Nu același lucru se întâmplă dacă avem o filieră cu rezistență mare (C→D), când se înregistrează o scădere a debitului.

După cum se știe din practică, debitul unei mașini de extrudare poate fi variat prin modificarea temperaturii topiturii în filieră. Așa cum se vede din ecuația (1.135), creșterea temperaturii determină o reducere a vâscozității și deci o creștere a debitului mașinii. Pe de altă parte, se înregistrează și o reducere a debitului sau caracteristicii melcului, așa cum se vede din figura (1.26). Se observă că se poate reduce presiunea de operare, modificând temperatura topiturii.

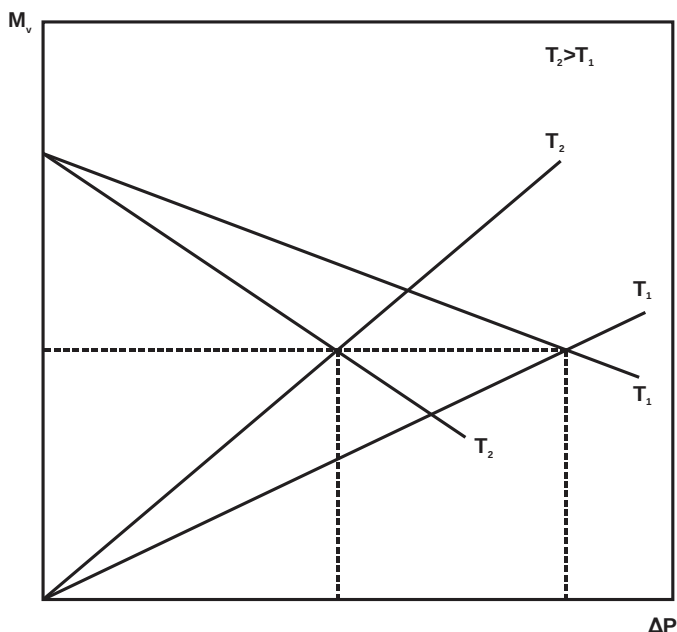


Figura 1.26. Efectul variației temperaturii în cilindru și filieră asupra caracteristicii extruderului

1.6.4.2.2. Operarea adiabatică

În cazul operării adiabate se consideră că extruderul nu schimbă căldură cu mediul. Puterea disipată de melc contribuie la ridicarea temperaturii topiturii. În aceste condiții, ecuația (1.133) devine:

$$\Delta p = \frac{k_a N - M_v}{k_p} \int_0^L \eta dz \quad (1.139)$$

Integrala din membrul drept poate fi evaluată dintr-un bilanț de energie. Astfel, pentru condiții staționare avem:

$$E_{\text{primită de topitură}} = E_{\text{disipată de melc}} \quad (1.140)$$

Energia primită de topitură determină creșterea temperaturii și a presiunii acesteia, iar energia disipată este dată de ecuația (1.107). În acest caz avem:

$$M_v C_p dT + M_v dp = k_E \eta N^2 dz + k_a N dp \quad (1.141)$$

Neglijând al doilea și al patrulea termen, se obține în final:

$$\eta dz = \frac{M_v \cdot C_p}{k_E N^2} dT \quad (1.142)$$

iar cu ecuația (1.133) rezultă caracteristica melcului:

$$M_v = k_a N - \frac{k_E k_p N^2}{M_v \cdot C_p} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta T} \quad (1.143)$$

Debitul este maxim în condițiile unei filiere cu rezistență nulă, adică cu $\Delta p = 0$:

$$M_{v_M} = \frac{M_v}{\Delta p = 0} = k_a N \quad (1.144)$$

Ecuația (1.143) poate fi scrisă în forma:

$$\left(\frac{M_v}{M_{v_M}} \right)^2 - \frac{M_v}{M_{v_M}} + \frac{k_E k_p}{k_a^2 C_p} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta T} = 0 \quad (1.145)$$

$$\text{Se vede că la } \left(\frac{M_v}{M_{v_M}} \right) = 1/2, (\Delta p / \Delta T)_{\max} = \frac{k_a^2 C_p}{4 k_E k_p} \quad (1.146)$$

astfel că avem în final:

$$\left(\frac{M_v}{M_{v_M}}\right)^2 - \left(\frac{M_v}{M_{v_M}}\right) + \frac{\Delta p/\Delta T}{4(\Delta p/\Delta T)_M} = 0 \quad (1.147)$$

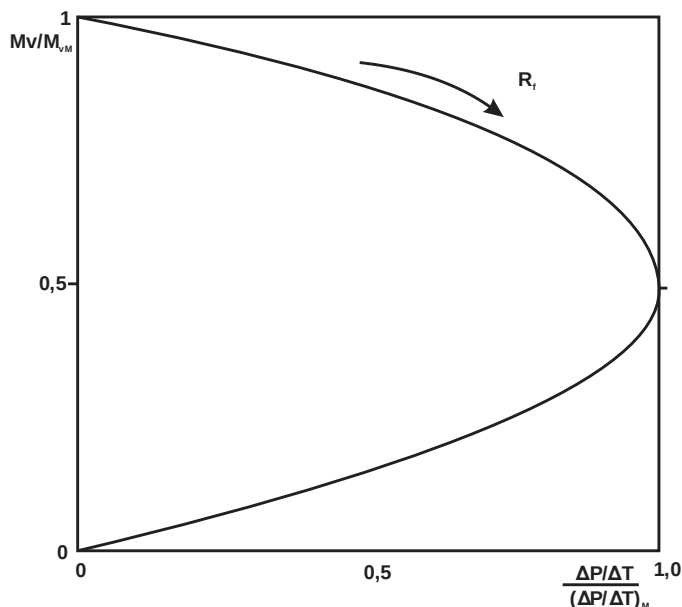


Figura 1.27. Caracteristicile adiabactice adimensionale ale melcului

După cum se vede din figura (1.27), la rezistența filierei nulă debitul este maxim, apoi acesta începe să scadă pe măsura creșterii rezistenței.

Raportul $\Delta p/\Delta T$ crește la început pe seama creșterii mai pronunțate a presiunii, după care, cu creșterea în continuare a rezistenței se înregistrează o creștere mai puternică a temperaturii, deci în final vom avea o scădere a raportului $\Delta p/\Delta T$.

Determinarea condițiilor de operare se face la fel ca la operarea izotermă.

Dacă se consideră că vâscozitatea variază cu temperatura după o lege de tip Arrhenius, adică:

$$\eta = a \cdot e^{-bT} \quad (1.148)$$

și se introduce variabila:

$$X = \frac{\eta_i}{\eta_f} = \exp(b\Delta T) \quad (1.149)$$

unde η_f este vâscozitatea în filieră, prin integrarea ecuației (1.142) se obține final:

$$M_v = \frac{\eta_i b k_E N^2 z}{C_p (X - 1)} \quad (1.150)$$

Caracteristica filierei este:

$$M_{vf} = \frac{k_f \Delta p}{\eta_f} = \frac{k_f \cdot X \cdot \Delta p}{\eta_i} \quad (1.151)$$

Deci cu ajutorul ecuațiilor (1.149) și (1.151) se elimină Δp și ΔT din ecuația (1.143), obținându-se o ecuație în $M_v - x$, care cu ecuația (1.150) conduce la o singură ecuație în x . Rezolvarea acesteia se poate face pe cale grafică sau numerică. Apoi se determină cu ajutorul lui x toate condițiile de operare:

- ΔT cu ajutorul ecuației (1.149);
- debitul cu (1.150);
- Δp cu ajutorul ecuației (1.151).

1.6.5. Distribuția presiunii în lungul canalului melcului

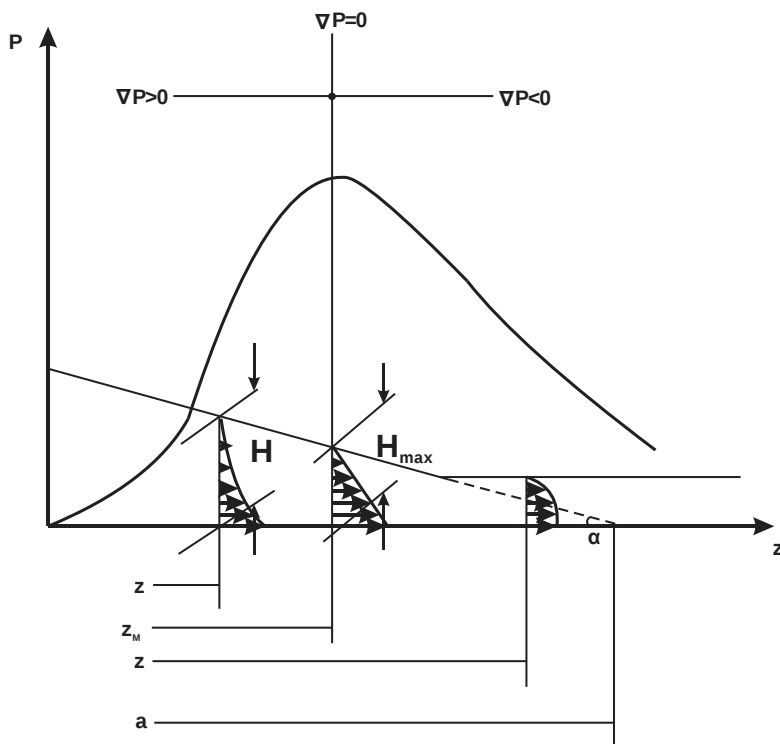


Figura 1.28. Variația presiunii pe lungimea canalului melcului

Dacă se consideră ecuația curgerii în forma cea mai simplă:

$$M_v = \frac{BHv_{z0}}{2} - \frac{BH^3}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

și se introduce înălțimea canalului, în funcție de unghiul α :

$$H = (a - z) \tan \alpha \approx (a - z) \alpha \quad (1.152)$$

se obține caracteristica melcului.

$$M_v = \frac{Bv_{z0}(a - z)\alpha}{2} - \frac{B\alpha^3(a - z)^3}{12\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (1.153)$$

Dar debitul mașinii este:

$$M_v = \frac{M_v}{\nabla p = 0} = \frac{BH_M v_{z0}}{2} = \frac{Bv_{z0}(a - z_M)\alpha}{2} \quad (1.154)$$

Înlocuind (1.154) în (1.153) și după integrare se obține:

$$p = \frac{6\eta v_{z0}}{\alpha^2(a-z)} - \frac{6\eta v_{z0}(a-z_M)}{2\alpha^2(a-z)^2} + C \quad (1.155)$$

Constanta de integrare se determină din condiția la limită:

$$z = 0, p = 0 \Rightarrow C = \frac{6\eta v_{z0}(a - z_M)}{2a^2\alpha^2} - \frac{6\eta v_{z0}}{a \cdot \alpha^2} \quad (1.156)$$

1.7. Calculul filierelor

În continuare se vor prezenta două metode de calcul a filierelor, fără să se ia în considerare recuperarea prin compresie, vâscoelasticitățile și tensiunea superficială.

Informațiile necesare pentru calculul unei filiere sunt:

- dimensiunea produsului în secțiunea perpendiculară pe direcția de curgere;
- debitul filierei;
- temperatura de extrudare;
- presiunea de extrudare;
- raportul de tragere sau etirarea la filieră.

Frecvent se utilizează două metode pentru calculul filierelor:

- metoda curbelor de curgere;
- metoda bazată pe legea puterii.

Metoda curbelor de curgere

Algoritmul de calcul pentru o filieră circulară constă în:

1. Se determină raza orificiului din condiția de continuitate:

$$M_{v_{\text{topitură}}} = M_{v_{\text{produs}}}$$

$$\pi R_0^2 V_0 = \pi R^2 V \Rightarrow R_0 = R \sqrt{\frac{V}{V_0}} = R \sqrt{e} \quad (1.157)$$

2. Se determină viteza de deformare aparentă cu formula:

$$\dot{\gamma}_a = -\frac{4M_v}{\pi R_0^3}$$

3. Se determină tensiunea la perete din curba de curgere pentru polimerul dat la temperatura dată;
4. Se calculează lungimea filierei cu formula:

$$\tau_p = \frac{R}{2} \frac{\Delta p}{L} \Rightarrow L = \frac{R}{2} \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Metoda bazată pe legea puterii

Se pleacă de la vâscozitatea aparentă:

$$\eta_a = \frac{\tau_p}{\dot{\gamma}_a} = \left(\frac{R \Delta p}{2L} \middle/ \frac{4M_v}{\pi R^3} \right) \quad (1.158)$$

de unde rezultă:

$$\frac{4M_v}{\pi R^3} = \frac{\Delta p R}{2L} \cdot \frac{1}{\eta_a} \quad (1.159)$$

Pe de altă parte, din legea puterii: $\tau_p = k \dot{\gamma}_a^n = k \left(\frac{4M_v}{\pi R^3} \right)^n$ rezultă:

$$\frac{4M_v}{\pi R^3} = \left(\frac{R \Delta p}{2Lk} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1.160)$$

Din ultimele două egalități se obține: $\frac{1}{\eta_a} = \frac{\left(\frac{R\Delta p}{2Lk}\right)^{1/n}}{\frac{\Delta p R}{2L}}$ care împreună

cu ecuația debitului $M_v = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta_a L}$ conduce la valoarea lungimii:

$$L = \frac{\pi^n R^{3n+1} \Delta p}{k \cdot 2^{2n+1} \cdot M_v^n} \quad (1.161)$$

Deci pentru calculul lungimii filierei sunt necesare constantele reologice k și n ale topiturii, care pot fi determinate din curbele de curgere.

Dacă se analizează curbele de curgere pentru majoritatea polimerilor cu aplicabilitate industrială se constată că pe porțiuni, acestea pot fi approximate cu drepte, cei doi parametri reologici fiind dați de expresiile:

$$k = \frac{\tau_{p2}}{\left(\dot{\gamma}_{a2}\right)^n} = \frac{\tau_{p1}}{\left(\dot{\gamma}_{a1}\right)^n} \quad (1.162)$$

$$n = \frac{\lg(\tau_{p2}/\tau_{p1})}{\lg(\dot{\gamma}_{a2}/\dot{\gamma}_{a1})} \quad (1.163)$$

în care τ_{p1} și τ_{p2} , respectiv $\dot{\gamma}_{a2}$ și $\dot{\gamma}_{a1}$, sunt tensiunile la perete și vitezele de deformare corespunzătoare.

Algoritmul de calcul este deci:

1. Se aproximează curba de curgere pentru polimerul dat cu o dreaptă și se aleg două puncte arbitrare de coordonate $(\dot{\gamma}_{a1}, \tau_{p1})$ și $(\dot{\gamma}_{a2}, \tau_{p2})$;
2. Se calculează k și n cu relațiile (1.162) și (1.163);
3. Se calculează media valorilor k_1 și k_2 ;
4. Se calculează L cu relația (1.161).

1.8. Clasificarea și construcția mașinilor de extrudare

1.8.1. Clasificarea mașinilor de extrudare

Mașinile de extrudare pot fi clasificate după un număr mare de criterii.

a) În funcție de construcția organului activ principal:

- cu melc;
- fără melc;

Mașinile de extrudare cu melc pot fi clasificate la rândul lor după un număr mare de criterii:

a1) În funcție de numărul de melci:

- cu 1 melc;
- cu 2 melci;
- cu mai mulți melci.

a2) În funcție de modul de încălzire și topire a materialului prelucrat:

- mașini convenționale sau izoterme;
- mașini adiabate;
- mașini politrope.

a3) După modul de încălzire a cilindrului:

- cu agenți termici (abur, ulei, agenți termici organici);
- electric (cu rezistențe sau prin inducție).

a4) După modul de variație a turației melcului:

- cu variația în trepte;
- cu variația continuă (mecanic, hidraulic sau pe cale electrică).

Mașinile de extrudare fără melc pot fi:

- cu piston;
- cu cilindri (valț extruder);
- cu benzi;
- cu disc;

- cu roți dințate;
- bazate pe efecte speciale de comportare a topiturilor de polimer (pe baza efectului Weissenberg sau Reyleigh).

b) După unele funcții specifice pe care le realizează:

- cu degazare;
- pregătitoare;
- alimentate cu topitură;
- mașini pentru folii suflate (rotative);
- mașini pentru prelucrarea poroplastelor;
- mașini de extrudare granulare.

1.8.2. Construcția mașinilor de extrudare

În cadrul acestui paragraf se vor trata în special mașini de extrudare cu melc, în măsura în care acestea interesează pe inginerul chimist, care este preocupat mai ales de procesele care se desfășoară în mașină, de cunoașterea constructivă a principalelor părți componente și de corelația dintre parametrii constructivi și funcționali ai mașinii și proprietățile materialelor prelucrate, pe de o parte și proprietățile produselor finite, pe de altă parte.

Părțile componente mai importante ale unei mașini de extrudare cu melc sunt: batiul, cilindrul, melcul, capul de extrudare, sistemul de acționare, sistemul de încălzire-răcire și aparatura de reglare și control.

1.8.2.1. Batiul

Batiul poate fi confecționat din fontă sau din laminate. Batiurile din fontă sunt mai robuste și rigide, precum și mai ieftine. Cele din laminate prezintă avantajul unor comodități care rezultă din asamblare lor din mai

multe părți. Pe batiu se montează toate părțile componente ale mașinii, uneori chiar și tablourile de comandă.

1.8.2.2. Cilindrul

Cilindrul mașinii de extrudare, împreună cu melcul, constituie cuplul activ care contribuie la transportul, plastifierea, topirea, dozarea și pomparea topiturii prin capul de extrudare. Date fiind aceste funcții, cilindrul prezintă două roluri esențiale, rezervor pentru topitura omogenizată, de unde se alimentează capul de extrudare și spațiul pentru transportul și transformarea polimerului în topitură. Aceste două roluri impun două caracteristici esențiale cilindrului, rezistență mecanică și la abraziune și coroziune.

Pentru a satisface cele două condiții de mai sus, precum și pentru considerente economice, cilindrul mașinilor de extrudare se constituie din două straturi care nu totdeauna sunt net separate între ele:

- corpul de rezistență mecanică, în exterior;
- cămașă interioară, rezistentă la abraziune și coroziune.

Corpul de rezistență mecanică se dimensionează la presiunea de 400-500 bar și se execută din oțel-carbon sau oțel de construcție aliat, iar pentru extruderele pentru cauciuc se poate executa și din fontă.

Cămașa de rezistență la abraziune și coroziune se execută din oțel de niturare, aliaje de Ni, Co, Cr, Mo, Si, C și bor, aliaje hostelloy, aliaje „X” sau prin tehnica bimetalică. Ajustajul cămășii în corpul de rezistență se face prin presare pentru a se realiza un contact bun care asigură rezistențe termice minime și evită antrenarea acesteia în mișcare de rotație de către materialul din cilindru.

Construirea cilindrilor se poate realiza și prin turnare centrifugă cu aliaje X sau X-306, practic lipsit de fier, care contin 38 Ni, 38 Co, 8 Cr, 5 Mo, 4 Si, 3 C și 3 B. Aceste aliaje se călesc chiar în condițiile răcirii lente.

Aliajul X are durități HB = 680, iar aliajul X-306 HB = 510. Aceste aliaje sunt cu conductivitate termică bună și se utilizează până la temperaturi de 340°C. În cazul cilindrilor care prelucrează materiale cu agresivitate ridicată (determinată de descompunerea polimerilor, spre exemplu) pentru confecționarea cămășii interioare se pot folosi aliaje de tip hostelloy, care sunt mai moi, dar foarte rezistente la coroziune.

În zona orificiului de alimentare, cilindrul este prevăzut cu un canal de răcire, pentru a preveni plastifierea materialului în orificiu și deci blocarea acestuia. De asemenea, tot în zona de alimentare sau chiar și în zona de tranziție cilindrul poate să fie prevăzut pe suprafața interioară cu caneluri longitudinale, pentru a mări forța de frecare și a anula deplasarea tangențială a materialului solid sau a celui în stare de plastifiere.

Pentru buna funcționare a unei mașini de extrudare, cilindrul trebuie să îndeplinească unele condiții, cum sunt:

- forma perfect cilindrică;
- suprafața interioară să se caracterizeze printr-un coeficient de frecare optim realizării transportului materialului solid, etc.

1.8.2.3. Melcul

Melcul mașinilor de extrudare, împreună cu cilindrul, constituie cuplul activ, care realizează procesul de extrudare. Melcul este însă elementul cel mai important, dat fiind faptul că, prin caracteristicile constructive și funcționale, poate să realizeze prelucrarea diferitelor materiale, în condiții tehnologice diferite sau în vederea obținerii diferitelor produse.

Din analiza considerațiilor de mai sus rezultă funcțiile melcului:

- a) preluarea, transportul și compactizarea materialului solid introdus prin orificiul de alimentare al cilindrului;

- b) transformarea uneori a materialului solid în topitură;
- c) omogenizează topitura, fie numai prin realizarea curgerii transversale sau a curgerii local inverse (vezi distribuția vitezelor în canalul melcului) sau cu ajutorul unor zone special constituite pentru intensificarea procesului de transfer;
- d) intensifică fenomenele de transfer (caldură, impuls);
- e) realizează presiunea necesară pompării materialului prin filieră;
- f) efectuează unele procese speciale, cum ar fi: decompresia topiturii, degazarea acesteia, amestecarea, malaxarea.

Melcul de construcție obișnuită este format (figura 1.29) din miezul (1), spira sau spirele (2), canalul central pentru circulația unui agent termic (3) (uneori) și coada (4), pe care se fixează rulmenții și roata de acționare.

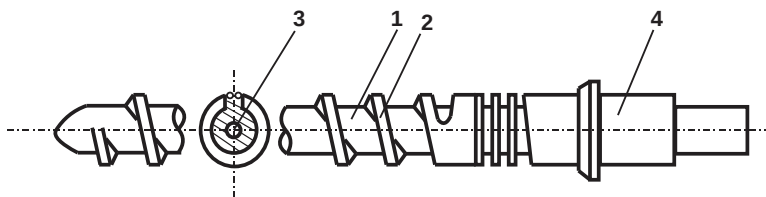


Figura 1.29. Melc pentru extruder

Melcii mașinilor de extrudare se construiesc din oțel de construcție, slab aliat cu Mn, Cr și Mo, călit superficial sau nitrurat, pentru prelucrarea maselor plastice, și din oțel de nitrurare sau oțel aliat cu Cr și Mo, îmbunătățit, cu planurile filetului călitate, pentru prelucrarea cauciucului.

O tehnologie modernă de realizare a melcilor mașinilor de extrudare constă în tehnica bimetalică. Astfel, firma Brux construiește melci cu întreaga suprafață acoperită cu un strat foarte subțire, dur și rezistent la abraziune și coroziune, dintr-un material de bază format din fier, nichel, crom, bor și carbon. Carbura de bor este dispersată foarte fin prin matricea

de metal asigurând un strat bimetalic foarte dur și rezistent la abraziune și coroziune. Melcii Brux 900, spre exemplu, sunt compatibili cu cilindrii Brux 100².

Melcul reprezentat în figura 1.29 este un melc obișnuit, format dintr-o singură spiră sau cu un singur început. Există și melci de construcție deosebită, care realizează funcții speciale, cum ar fi: malaxarea, amestecarea, omogenizarea sau deplasarea topiturii.

În figura 1.30 sunt reprezentate trei tipuri de zone de amestecare intensivă, cu efecte favorabile asupra proceselor de uniformizare a temperaturii topiturii și omogenizării acesteia.



Figura 1.30. Melci cu zone de amestecare intensivă

Firma Werner&Pfliderer construiește mașini de extrudare cu melci, utilizate mai ales pentru granulare. Melcii acestor mașini sunt construiți prin asamblarea unor elemente speciale pe un ax comun, ca în figura 1.31³. După cum se vede, se pot utiliza elemente de amestecare de diferite profile. Caracteristicile acestor elemente, numărul lor și modul de aranjare pe axul comun oferă multe grade de libertate de asamblare și deci, în final, posibilități foarte variate de a construi melci.

² Prospect firma Brux (Anglia, Oldsburg)

³ Prospect firma Werner&Pfliderer

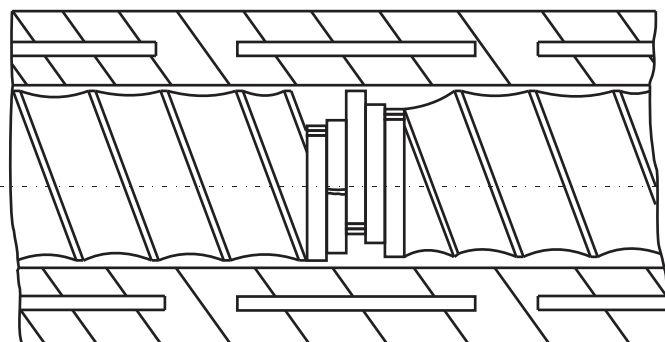


Figura 1.31. Construcția melcului mașinii de extrudare Z2K

Un melc de asemenea deosebit este și melcul BM construit de firma Maillefer⁴. Zona de plastifiere a acestui melc se obține prin suprapunerea a două tipuri de spire, una pentru zona de alimentare și alta pentru cea de dozare-pompare, după cum se vede în figura 1.32.

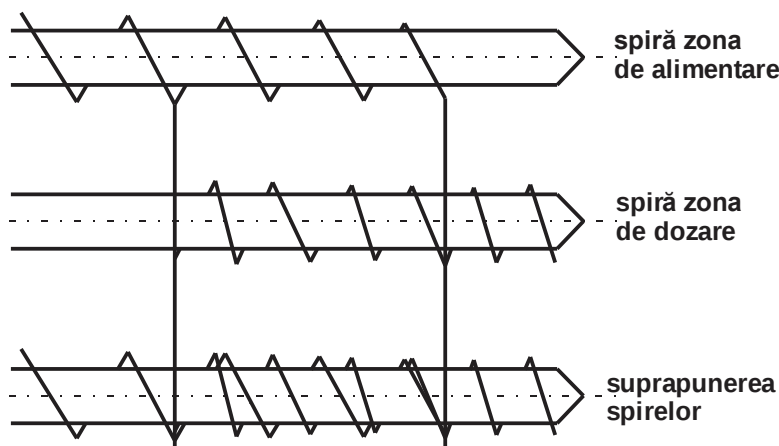


Figura 1.32. Construcția melcului Maillefer

Pentru realizarea decompresiei și a degazării topiturii, melcii sunt prevăzuți cu zone de construcție specială, care constă într-o reducere a

⁴ Prospect firma Maillefer

presiunii prin creșterea secțiunii de curgere care realizează o micșorare a vitezei topiturii. Un astfel de melc este prezentat în figura 1.33.



Figura 1.33. Melc cu zonă de decompresie

Caracteristicile constructive și funcționale ale unui melc sunt:

- diametrul, D ;
- lungimea relativă, L/D ;
- numărul zonelor funcționale și lungimea lor;
- raportul de compresie, r_c ;
- geometria canalului;
- unghiul de înclinare a spirelor;
- turația.

Diametrul melcului variază în limite foarte largi, între aproximativ 30 mm și 600 mm, acesta depinzând de natura materialului prelucrat, tipul mașinii de extrudare și natura produsului obținut. Pentru prelucrarea materialelor plastice se folosesc melci cu diametre între 30 și 250 mm, iar pentru folii suflate se utilizează melci cu diametrul între 25 și 65 mm. Pentru prelucrarea cauciucului se folosesc melci mai mari, cu diametrul între 38 și 380 mm. Melcii cu diametrele cele mai mari se folosesc în general pentru liniile de granulare. Astfel, firma Berstarff construiește un extruder pentru o linie de granulare cu diametrul melcului de 600 mm și o lungimea relativă de 24 mm⁵. Turația melcului este 60 rpm, puterea de antrenare 4000 KW, iar productivitate 22300 kg/h.

⁵ Prospect firma Berstarff

Lungimea relativă este o caracteristică foarte importantă. De dorit, aceasta ar trebui să fie cât mai mare, pentru a realiza o presiune stabilă, omogenizare bună și deci o calitate deosebită a produsului finit. Lungimea relativă este însă limitată de rezistența la solicitările la torsiune. Pentru prelucrarea materialelor termoplastice se utilizează, în general, melci cu lungime cuprinsă între 18–24, iar pentru prelucrarea cauciucului se folosesc melci mai scurți cu lungimea relativă între 4 și 12. Pentru prelucrarea unor polimeri în vederea obținerii fibrelor se utilizează melci cu lungimea relativă până la 36. După lungimea lor relativă, melcii se împart în melci scurți și lungi, după cum aceasta este mai mică sau mai mare de 12.

Melcii mașinilor de extrudare au trei zone funcționale de bază:

- zona de alimentare;
- zona de plastifiere, tranziție sau compresie;
- zona de dozare sau pompare;

Delimitarea celor trei zone funcționale nu poate fi făcută totdeauna, iar unii melci pot fi prevăzuți cu zone funcționale speciale, cum ar fi: zonele de decompresie și degazare, de amestecarea intensivă sau zone de malaxare. Decompresia topiturii se realizează printr-o mărire a secțiunii de curgere, iar amestecarea intensivă printr-o variație repetată a secțiunii care produce în cele din urmă variații ale vitezei.

Lungimea zonelor funcționale poate să varieze foarte mult. După Schenkel, lungimea relativă pentru zonele de bază variază între limitele:

- zona de alimentare: $L/D = 2 - 19$;
- zona de plastifiere: $L/D = 3 - 13$.

Raportul de compresie reprezintă raportul dintre secțiunile de curgere de la capătulul de alimentare și cel de dozare-pompare, adică:

$$r_c = \frac{\pi(D-H_a) \cdot H_a}{\pi(D-H_d) \cdot H_d} = \frac{D-H_a}{D-H_d} \cdot \frac{H_a}{H_d} \quad (1.164)$$

Acest raport trebuie să corespundă cu raportul de compresie calculat din raportul densităților materialului prelucrat:

$$r_c = \frac{\rho_a}{\rho_d} \quad (1.165)$$

în care ρ_a și ρ_d sunt densitățile în zona de alimentare (în gramadă) și de dozare (topitură).

Raportul de compresie variază, în general, între 1,8 – 6, pentru mase plastice, și 1,12 și 2,5 pentru cauciuc.

Geometria canalului melcului este determinată de modul în care variază cu lungimea, pasul filetului și adâncimea canalului. Acestea pot să varieze continuu sau în trepte. Adâncimea canalului poate fi constantă sau variabilă pe lățimea acestuia, așa cum rezultă din figura 1.34.

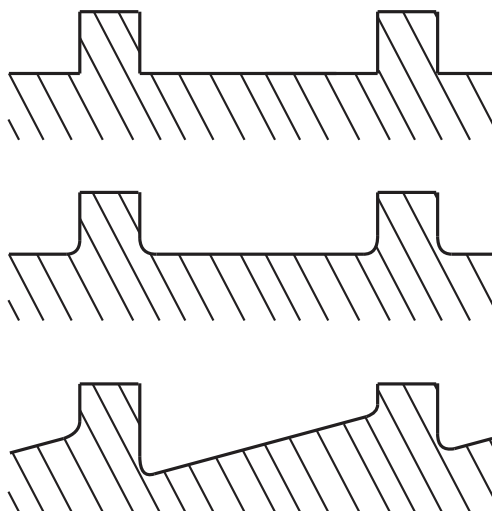


Figura 1.34. Diferite geometrii ale secțiunii canalului melcului

În funcție de modul de variație al pasului și adâncimea canalului avem următoarele posibilități:

- melci cu pas constant și adâncime constantă;
- melci cu pas constant și adâncime variabilă;
- melci cu pas variabil și adâncime constantă;
- melci cu pas variabil și adâncime variabilă.

Grosimea filetului este de $0,08D$ până la $0,1D$, iar jocul dintre spire și cilindru este $(0,002 - 0,005)D$.

Majoritatea melcilor mașinilor de extrudare se construiesc de forma cilindrică, dar există și melci de forme diferite ca: melci conici, parabolici, eliptici, în formă de trunchi de con sau melci cu geometrie complexă.

Unghiul de înclinare al filetului α poate să varieze destul de mult. Astfel, pentru prelucrarea cauciucului, acest unghi este cuprins între 12° și 30° , dar în cazul maselor plastice se folosesc frecvent unghiuri de aproximativ $17^\circ 40'$, ceea ce corespunde unui pas egal cu diametrul melcului.

Turația melcului este un parametru hotărâtor pentru debitul mașinii de extrudare. În general, turația variază între limitele $10 - 1000$ rot/minut. Pentru mașinile izoterme, turațiile sunt cuprinse între $10 - 100$ rot/min, iar la cele adiabate între $200 - 1000$ rot/min.

Melcii extruderelor pot fi clasificați după multe criterii. Astfel:

a) După numărul spirelor:

- cu un singur început
- cu mai multe începuturi.

b) După geometria canalului:

- cu pas și adâncime constante;
- cu pas constant și adâncime variabilă;
- cu pas variabil și adâncime constantă;
- cu pas și adâncime variabile.

c) După forma melcului:

- cilindric
- conic
- parabolic
- eliptic
- de formă complexă

d) După lungimea relativă:

➤ melci scurți, cu $L_r \leq 12$

➤ melci lungi, cu $L_r \geq 12$

În general, melcii scurți se utilizează pentru prelucrarea cauciucului sau la unele extrudare pentru destinații speciale, iar melcii cei mai lungi se utilizează la mașinile care fac parte din liniile de filare.

e) După regimul termic:

➤ melci încălziți

➤ melci răciți

➤ melci neutri

f) După numărul și natura zonelor funcționale:

➤ melci obișnuiți

➤ melci cu una sau mai multe zone de amestecare intensivă sau malaxare

➤ melci cu una sau mai multe zone de decompresie și de gazare.

g) După natura materialului prelucrat:

➤ melci pentru prelucrarea elastomerilor

➤ melci pentru prelucrarea polietilenei

➤ melci pentru prelucrarea poliamidelor

➤ melci pentru prelucrarea PVC

➤ melci pentru prelucrarea poliacriților și polimetacriților.

Pentru prelucrarea elastomerilor se utilizează melcii cei mai scurți, având lungimea relativă 4-12. Polietilena se prelucurează cu melci cu lungimea relativă 15-18, prevăzuți de regulă cu un singur filet.

Policlorura de vinil, împreună cu substanțele auxiliare care se adaugă, în principal plastifiantul, formează o clasă de materiale cu proprietăți reologice foarte diferite, de la PVC dur la cel plastifiat. PVC-ul se caracterizează prin vâscozitate foarte mare motiv pentru care acesta nu suportă viteze de formare prea mari, care pot duce la descompunere datorită supraîncălzirilor locale datorate disipării energiei mecanice. Pentru aceste motive se recomandă melci cu adâncime mare la începutul canalului. În

general se utilizează melci cu lungimea relativă 15-22 pentru PVC dur și 15-18 pentru cel plastifiat. Raportul de compresie recomandat este 15.

Prelucrarea poliamidelor se caracterizează printr-un interval îngust de temperatură în care are loc topirea, de aceea se recomandă melci cu lungimea zonei de plastifiere mai mică, lungimea relativă fiind cuprinsă între 15-20, la filarea fibrelor și firelor chiar până la 36.

Topiturile de poliacrilați și polimetacrilați se caracterizează printr-un domeniu îngust de temperatură. Melcul este puternic solicitat la torsiune și se recomandă execuția din oțeluri foarte rezistente la această solicitare. Se folosesc lungimi relative cuprinse între 10-17 și un raport de compresie de aproximativ 2.

Acționarea melcului unui extruder trebuie să permită variația continuă a turației acestuia. De asemenea, sistemul de acționare mai trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- Transmiterea puterii necesare
- Siguranță în funcționare
- Comandă simplă
- Montarea și demontarea ușoară a melcului

În principiu acționarea poate fi făcută cu motoare electrice cu turație constantă și variatoare de turație în trepte sau continue, sau cu motoare cu turație variabilă.

Modificarea continuă a turației poate fi realizată cu variatoare mecanice sau hidraulice.

Modificarea turației în trepte se poate face cu ajutorul reductoarelor cu roți dințate, cu curele sau cu motoare cu număr comutabil de poli.

Variația continuă a turației pe cale electrică se poate realiza cu motoare de curent continuu sau cu ajutorul grupurilor Ward-Leonard.

În cazul acționării melcilor pentru mașini izoterme este necesară o reducere mai mare a turației.

În figura următoare se reprezintă o schemă cinematică a unui sistem de acționare prevăzut cu motor de curent alternativ și reductor continuu de turație de tip mecanic (PIV).

Motorul electric (6) transmite mișcarea de rotație la melcul (1) prin intermediul reductorului continuu de turație PIV și a roților dințate (2) cu ajutorul cărora se realizează reducerea în trepte a turației. Reductorul PIV are ca părți mai importante două perechi de trunchiuri de con peste care rulează un lanț. Prin apropierea și îndepărtarea celor două trunchiuri de con, cu ajutorul roții de mână (3), se realizează modificarea continuă a raportului de transmisie de la o pereche la cealaltă a trunchiului de con.

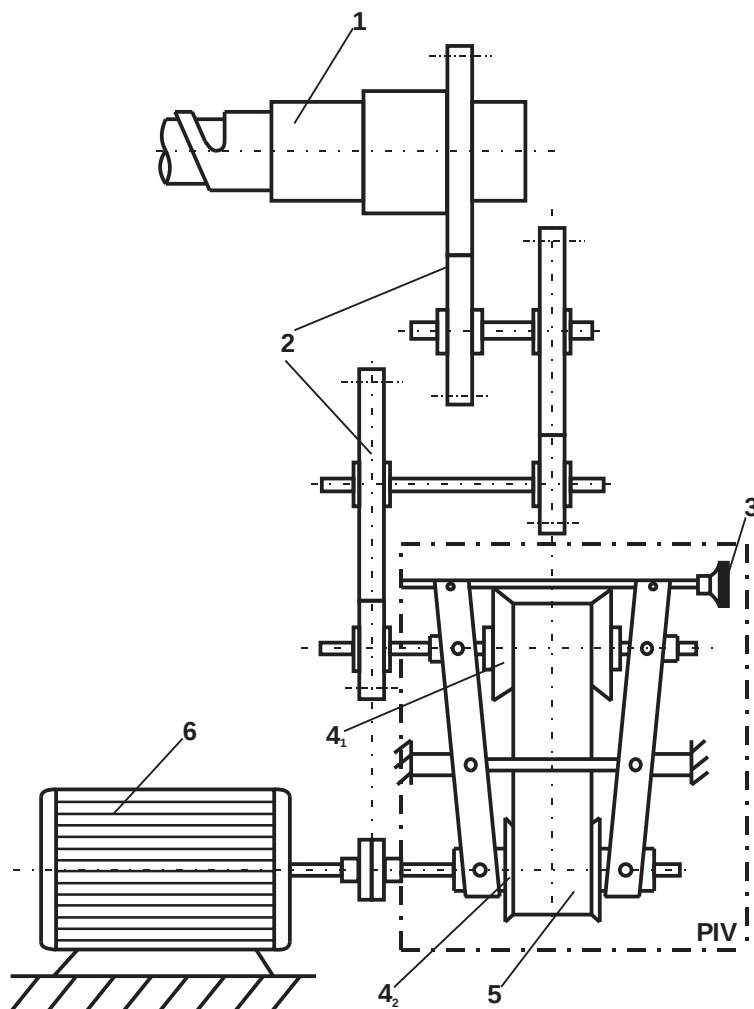


Figura 1.35. Schema cinematică a sistemului de acționare a melcului

1.8.2.4. Capul de extrudare

Capul de extrudare este un ansamblu de piese cu ajutorul căruia topitura este transformată în produs. Partea cea mai importantă a unui cap de extrudare este filiera, prin care curge topitura de material dând astfel forma produsului, într-o secțiune transversal pe direcția de curgere.

Construcția și calculul unui cap de extrudare depinde în cea mai mare măsură de filiera, care la rândul ei depinde de natura produsului extrudat.

Diversitatea produselor extrudate fiind infinită rezultă infinitatea filierelor reale și deci a corpurilor de extrudare.

Pentru sistematizarea și simplificarea calculelor de proiectare se definesc trei tipuri fundamentale de filiere. În continuare se va face o clasificare a corpurilor de extrudare, după care se va prezenta obținerea plăcilor.

1.8.2.4.1. Tipuri fundamentale de filiere

Există trei tipuri fundamentale de filiere:

- Filiera circulară
- Filiera inelară
- Filiera tip fantă lată

Aceste tipuri fundamentale de filiere pot fi utilizate pentru a calcula practic toate filierele reale.

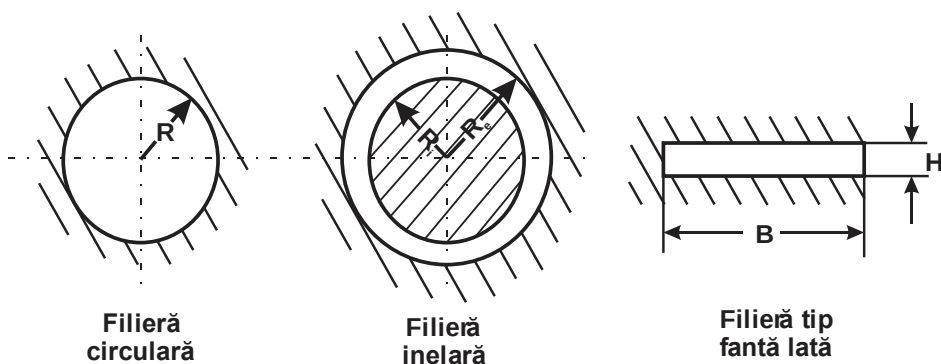


Figura 1.36. Tipuri fundamentale de filiere

1.8.2.4.2. Clasificarea capurilor de extrudare

a) După direcția de refulare a extrudatului în raport cu direcția de curgere a topiturii în cilindrul extruderului:

- Cap de extrudare axial
- Cap de extrudare în unghi
- Cap de extrudare axial-parallel

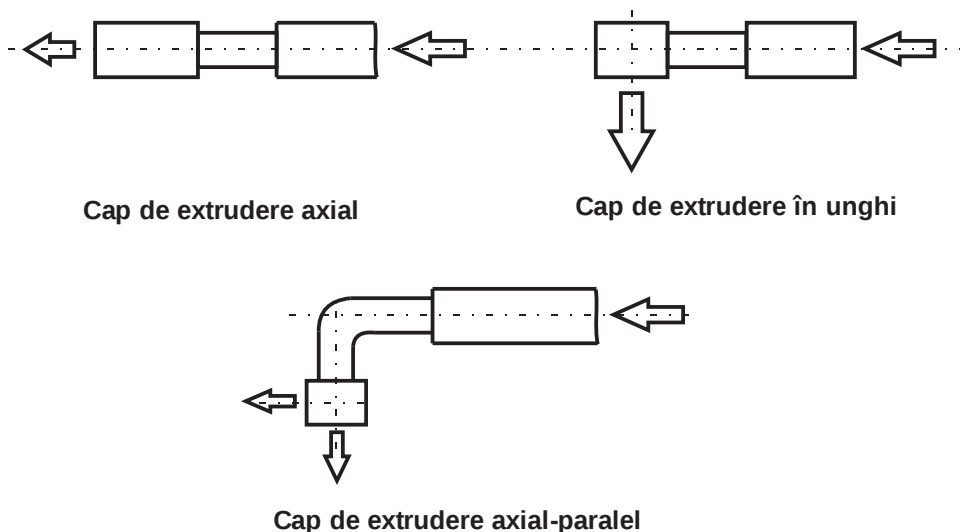
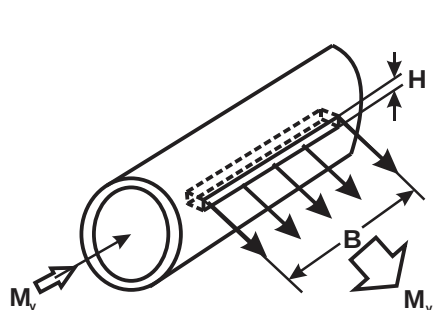


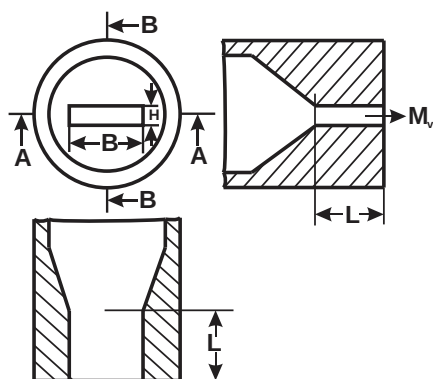
Figura 1.37. Capuri de extrudare

b) După natura produsului extrudat:

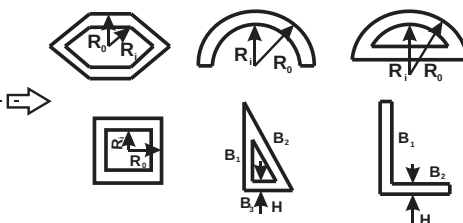
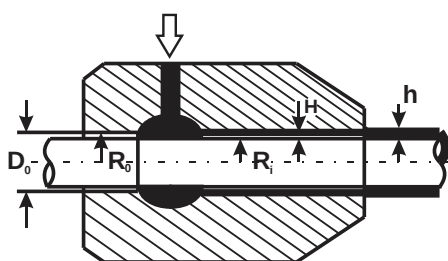
- Cap de extruder pentru bare
- Cap de extruder pentru profile
- Cap de extruder pentru plăci
- Cap de extruder pentru fire
- Cap de extruder pentru folii suflate
- Cap de extruder pentru acoperirea cablurilor
- Cap de extruder pentru granulare



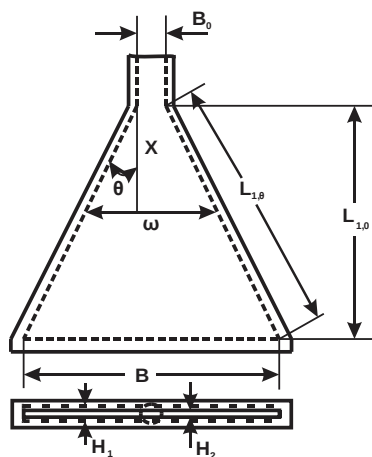
MANIFOLD pentru folii



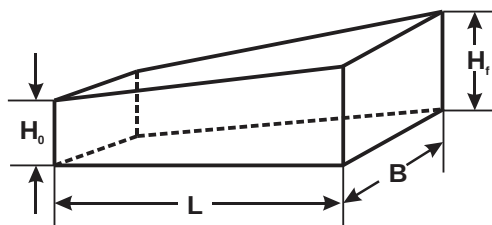
Tip fantă pentru foi și folii



Filiere pentru acoperirea cablurilor



Filieră tip evantai sau coadă de pește



Filieră tip pană

Figura 1.38. Tipuri de filiere

În figura de mai sus sunt prezentate câteva exemple de filiere pentru obținerea unor produse deosebite.

1.8.2.4.3. Construcția unui cap de extrudare

Dat fiind faptul că un cap de extrudare este un ansamblu de multe piese, în figura următoare se dă schema unui cap de extrudare mai simplu, un cap de extrudare pentru obținerea plăcilor. Acest tip de cap de extrudare este prevăzut cu o filieră tip fantă lată.

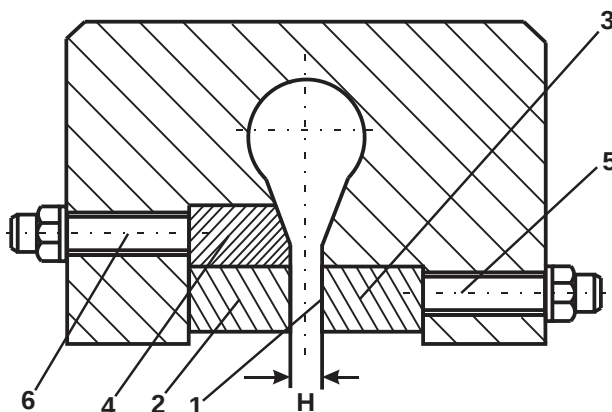


Figura 1.39. Schema de principiu a unui cap de extrudare pentru plăci sau foi

Filiera (1) este delimitată de cele două buze sau fălci (2) și (3), prima fixă și a doua ajustabilă. Bara de debit (4) are rolul să compenseze variațiile de presiune de la trecerea de la secțiunea circulară la cea tip fantă lată. Există și alte două metode pentru compensarea acestei diferențe de presiune:

- modificarea înălțimii H a filierei, pe măsura reducerii presiunii;
- modificarea temperaturii care reduce vâscozitatea, crescând astfel debitul de topitură.

Șuruburile (5) și (6) sunt utilizate pentru a regla poziția fălcii (buzei) mobile sau a barei.

1.9. Dispozitive auxiliare

În afară de mașina de extrudare propriu-zisă, o linie sau o instalație de extrudare este echipată cu unele instalații sau dispozitive anexe sau auxiliare cum sunt:

- ✓ Dispozitive de alimentare;
- ✓ Dispozitive de răcire;
- ✓ Calibroare;
- ✓ Trăgătoare;
- ✓ Dispozitive de ondulare;
- ✓ Dispozitive de tipărire;
- ✓ Dispozitive de preluare sau receptive (înfășurătoare).

1.9.1. Alimentatoare

Alimentarea mașinilor de extrudare se face cu ajutorul unor pâlnii cilindro-conice prevăzute cu ferestre de observație, racord de descărcare și uneori cu agitatoare pentru prevenirea formării bolților de material care pot întrerupe alimentarea.

Pâlniile mai pot fi prevăzute la partea inferioară cu unele dispozitive de dozare, cum ar fi cele pentru indicarea nivelului (inferior și superior).

În figura 1.40 sunt redată câteva tipuri de alimentatoare, cel mai simplu fiind cel din poziția a). În figura 1.40 b) – d) sunt redată trei variante de pâlnii de alimentare prevăzute cu agitatoare care se rotesc cu turație mică și au rolul să prevină formarea bolților și blocarea materialului în pâlnie. În

figura 1.40 e) este schițată o pâlnie prevăzută cu dozator cu melc care poate fi acționat cu turație variabilă pentru a regla debitul de material alimentat.

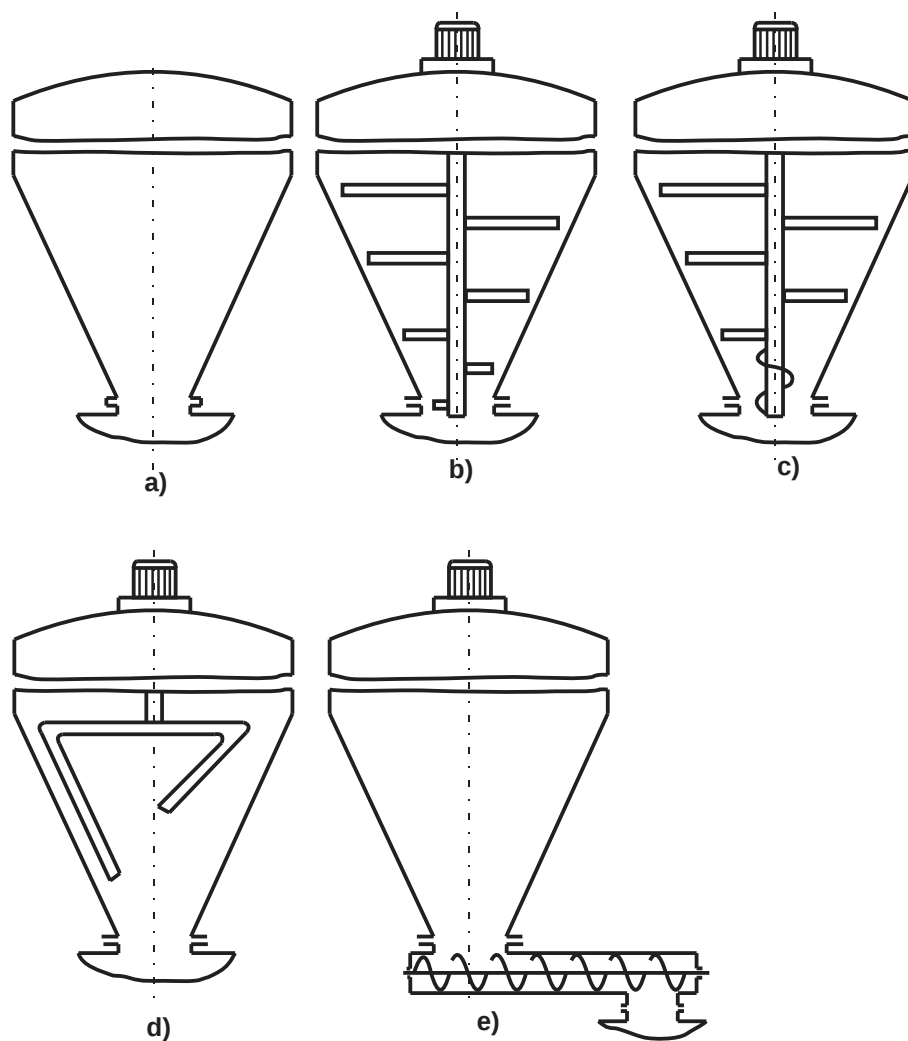


Figura 1.40. Dispozitive de alimentare a extruderelor

1.9.2. Dispozitive de răcire

Construcția dispozitivelor de răcire este în general în funcție de natura produsului fabricat de extruder. În general, răcirea produselor extrudate se poate face prin contact direct cu agentul termic de răcire sau indirect, prin contactul cu suprafețe răcite. Ca agenți de răcire se folosesc, în general, aerul și apa.

La unele produse rigide răcirea acestora se face în baia de calibrare. Pentru foi și folii se folosesc dispozitive speciale ca cele din figurile 1.41 și 1.42.

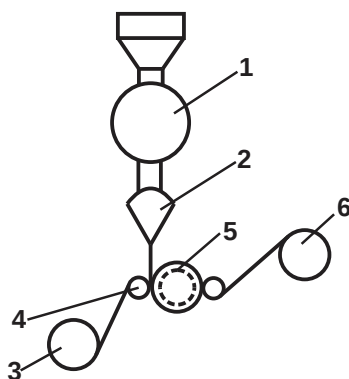


Figura 1.41. Instalație de extrudare-acoperire a hârtiei: 1 – extruder, 2 – cap de extrudare; 3 – rola de hârtie; 4 – cilindru de presare; 5 – cilindru de răcire; 6 – înfășurător.

În figura 1.41 este prezentată o instalație de răcire a hârtiei acoperite cu o folie de material plastic. Răcirea se realizează prin contactul direct cu suprafața rece a unui cilindru de răcire (5). Foile se răcesc, de regulă, prin contactul cu o suprafață rece, așa cum reiese și din figura 1.42.

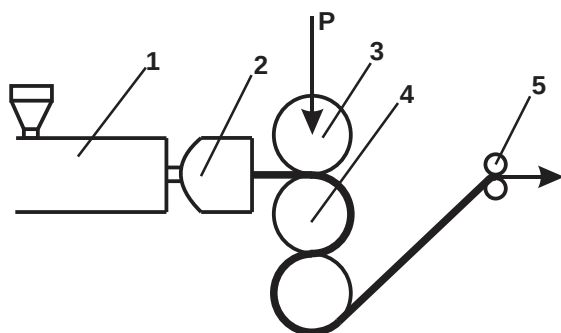


Figura 1.42. Instalație de extrudare a foilor: 1 – extruder; 2 – cap de extrudare; 3 – cilindru de presare; 4 – cilindri de finisare-răcire; 5 – cilindri de tragere.

În figura 1.43 se reprezintă mai multe variante ale răcirii foliilor suflate. Astfel, acestea pot fi răcite cu aer prin suflarea acestuia printr-un inel montat în imediata apropiere a ieșirii foliei din capul de extrudare-suflare sau prin manșoanele interioare sau exterioare. Manșonul (2) și (3), precum și răcitorul (4) montat în interiorul balonului sunt răcite cu apă, iar (5) este un tub prin care se recirculă aerul. Aerul cald este aspirat pe la partea superioară și refulat, după răcire, pe la partea inferioară.

Data fiind circulația liberă a balonului de folie suflată în hala de producție, pentru un control eficient al procesului de răcire care are o mare influență asupra caracteristicilor finale, se recomandă utilizarea soluțiilor care realizează răcirea pe o cât mai mare parte a traseului până la dispozitivul de foliere, tragere și înfășurare.

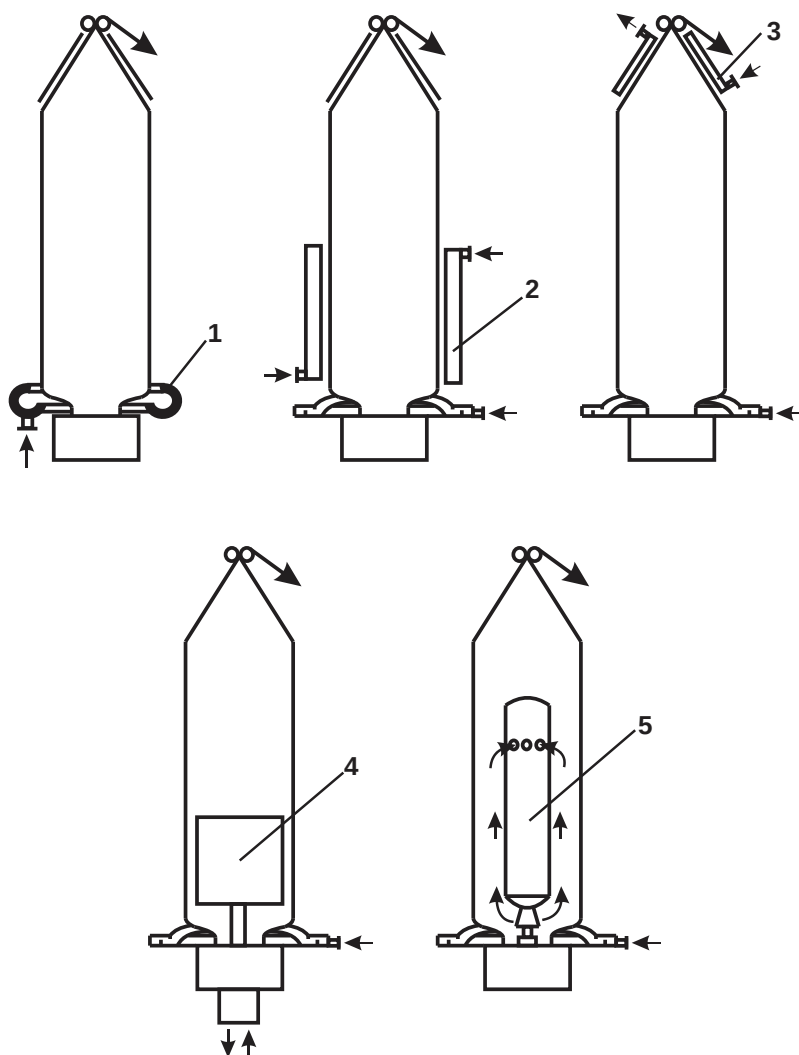
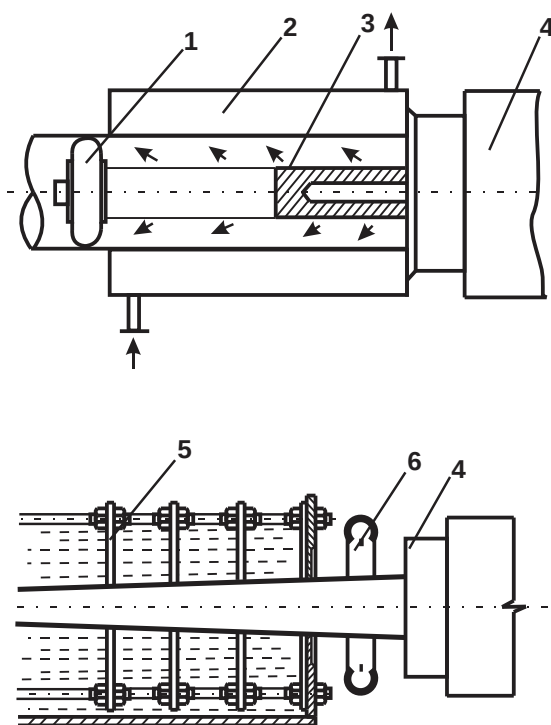


Figura 1.43. Instalații pentru răcirea foliilor suflate: 1 – inel de suflare aer; 2 – manșon de răcire cu apă; 3 – manșon de răcire; 4 – răcitor interior cu apă; 5 – tub interior de răcire cu aer.

1.9.3. Calibroare

În cazul fabricării prin extrudare a produselor rigide sau semirigide, cum sunt diferite profile sau țevile, se impune operația de calibrare, care poate fi interioară, exterioară sau de ambele tipuri.

În figura 1.44 sunt prezentate trei tipuri de calibroare. Primul se utilizează pentru calibrarea tuburilor cu diametrul mai mic, iar ultimul pentru bare. În toate cazurile, răcirea se realizează cu ajutorul apei, fie prin contactul direct, fie indirect.



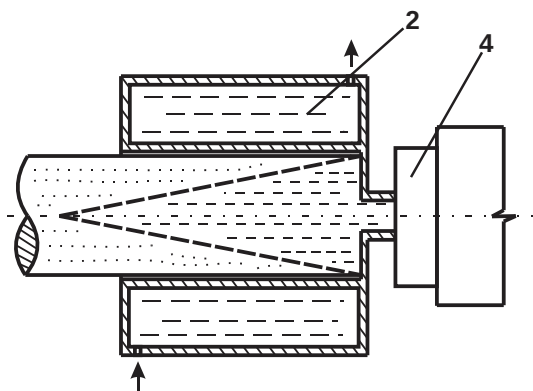


Figura 1.44. Dispozitive de calibrare și răcire: 1 – dop pentru calibrare interioară și etanșare; 2 – baie de răcire; 3 – tub pentru suflarea aerului; 4 – cap de extrudare; 5 – plăci pentru calibrare; 6 – inel de suflare sau pulverizare a agentului de răcire.

Presiunea aerului suflat prin tubul (3), legat de dorn, depinde de diametrul țevii, grosimea peretelui și caracteristicile reologice ale topiturii de material și variază, în general, între $3\text{-}30\text{kN/m}^2$.

1.9.4. Trăgătoare

Produsele realizate prin extrudare sunt trase din capul de extrudare cu ajutorul unor dispozitive speciale numite trăgătoare. În general, se utilizează trei tipuri de trăgătoare:

- ✓ cu role
- ✓ cu curele
- ✓ cu șenile.

Utilizarea unuia sau a altuia din cele trei tipuri de trăgătoare depinde în general de natura produsului obținut. Astfel, profilele rigide sau tuburile se trag, în general, cu ajutorul trăgătoarelor cu șenile. Tot pentru tuburi, mai

ales cele cu pereții subțiri, se pot utiliza trăgătoare cu curele, iar trăgătoarele cu role se utilizează pentru tragerea profilelor, a foilor și foliilor.

Pentru foliile și foile răcite se utilizează trăgătoare cu role sau cilindri, în general acoperiți cu cauciuc pentru a preveni patinarea acestora, iar în cazul foliilor și foilor nerăcite se utilizează cilindri sau role de tragere metalice, eventual răcite, pentru a preveni lipirea materialului pe suprafața acestora. În figura 1.45 sunt prezentate cele trei tipuri de trăgătoare mai larg utilizate.

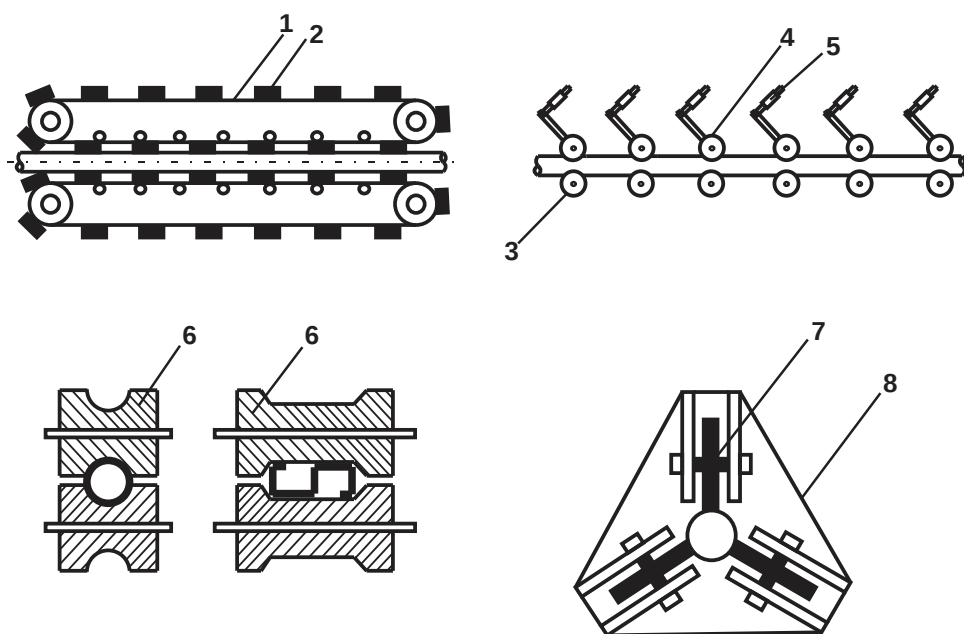


Figura 1.45. Trăgătoare cu șenile, role și curele: 1 – șenilă; 2 – plăci de cauciuc; 3 – role trăgătoare; 4 – role de presare; 5 – contragreutăți; 6 – role profilate; 7 – curele de tragere; 8 – cadru de susținere.

Trăgătorul cu șenile este format din două șenile, una fixă, inferioară și una superioară reglabilă pe verticală, în funcție de dimensiunile produsului tras. Trăgătorul cu role este format din două trenuri de role, cele inferioare trăgătoare, iar cele superioare din două trenuri de presare; pentru

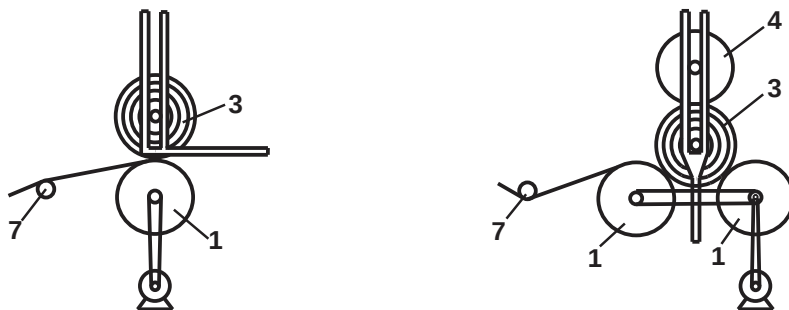
tragerea foliilor sau foilor. Cele două trenuri de role pot fi montate pe două axe perpendiculare pe direcția de tragere. Rolele pot fi simple sau profilate.

Trăgătorul cu curele este format în general din trei curele fixate pe un cadru și care au posibilitatea să prindă produse de diferite dimensiuni.

1.9.5. Înfășurătoare

În cazul fabricării prin extrudare a unor produse flexibile, cum sunt filmele, tuburile, cablurile sau unele tuburi subțiri și flexibile se utilizează dispozitive de înfășurare sau înfășurătoare.

Dispozitivul trebuie să fie astfel proiectat încât să aplice fie o tensiune constantă materialului înfășurat sau un moment constant la axul înfășurătorului. Dispozitivele care realizează tensiune constantă sunt prezentate în figura 1.46, iar cele cu moment constant sunt schițate în figura 1.47.



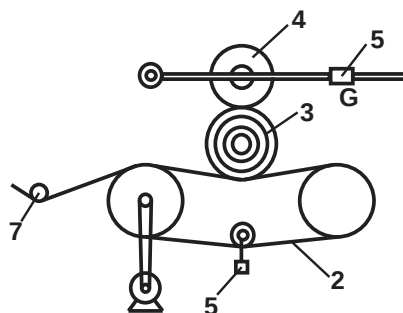


Figura 1.46. Dispozitive de înfășurare cu tensiune constantă: 1 – tobă purtătoare; 2 – bandă purtătoare; 3 – bobina; 4 – cilindru de presare; 5 – contragreutate; 6 – regulator de viteză a motorului de antrenare; 7 – cilindru curbat.

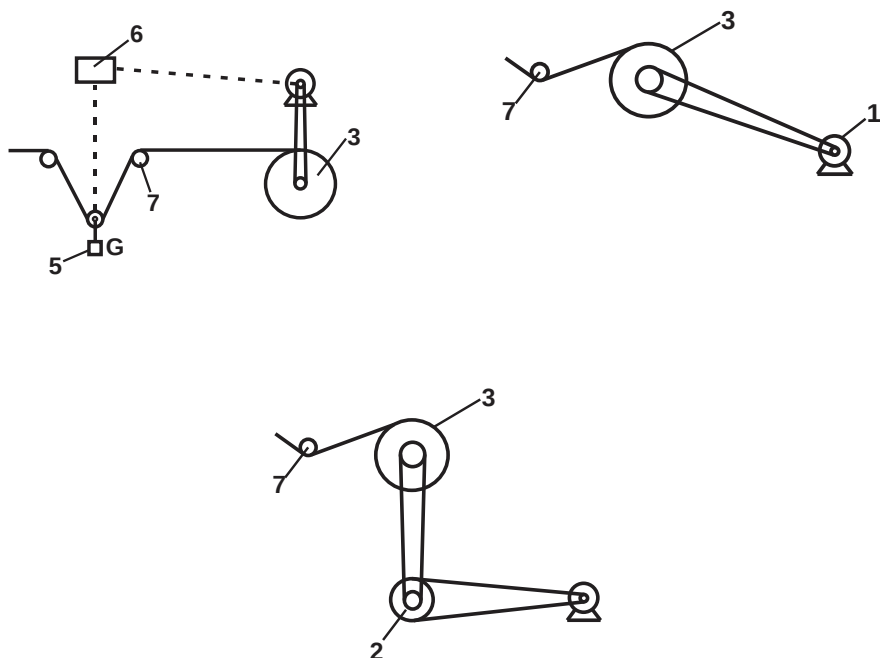


Figura 1.47. Dispozitive de înfășurare cu moment constant: 1 – motor de antrenare cu moment constant; 2 – cuplaj cu moment constant; 3 – bobina de material; 7 – cilindru curbat.

Înfășurătoarele cu tensiune constantă sunt avantajoase când se înfășoară produse rigide, cum sunt hârtiile acoperite sau cablurile, care permit formarea unei bobine mai dense. În cazul filmelor elastice se utilizează dispozitive cu moment constant pentru a reduce efectul compresiv al straturilor exterioare ale unei bobine noi în vederea împiedicării creșterii presiunii care ar putea strivi miezul bobinei. Diametrul bobinei nu depășește, în general $1/3$ din diametrul miezului, din cauza că tensiunea scade pe măsura creșterii diametrului până la o valoare care nu mai permite înfășurarea (banda de material este aproape liberă și nu se înfășoară).

Capitolul II. MASINI DE INJECTIE

2.1. Introducere

Formarea prin injecție este o operație larg folosită pentru obținerea unei game foarte variate de produse din, practic, majoritate polimerilor. Se pot obține astfel articole tehnice, bunuri de larg consum, jucării, ambalaje, etc., din polimeri cum sunt: polietilena, polipropilena, polistiren, policlorura de vinil, poliamide, poliacrilați, derivați de celuloză, elastomeri, etc.

Produsele de injecție se fabrică în serii foarte mari și au mase care pot varia în limite foarte largi, de la piesele foarte mici până la piese de ordinul kilogramelor și chiar mai mari.

Procesul de formare prin injecție constă în plastifierea polimerului, introducerea topiturii sub presiune în cuiburile matriței, solidificarea topiturii în aceste cuiburi și deschiderea matriței, urmată de scoaterea produselor din cuiburi.

2.2. Scheme de principiu ale mașinilor de injecție

Există în prezent două tipuri de mașini de injecție, cu piston și cu melc-piston, a căror schemă de principiu este dată în figura 2.1. Diferențe mai importante se observă în partea care realizează plastifierea materialului prelucrat și injecția topiturii, numită agregatul de plastifiere și injecție. În primul caz, plastifierea se realizează într-un cilindru, topitura rezultată fiind injectată cu ajutorul unui piston (1) în cuiburile matriței (3). În cazul mașinilor cu melc-piston, procesul de plastifiere se realizează ca la mașinile de extrudare, iar injectarea materialului plastifiat se realizează prin deplasarea axială a melcului-piston (2). Eficiența procesului de plastifiere și mai ales omogenizarea topiturii este mai slabă în cazul mașinilor cu piston,

motiv pentru care rezerva de topitură din cilindrul unor astfel de mașini este de 8 – 10 ori mai mare decât cantitatea de topitură necesară la o injecție. Îmbunătățirea procesului de omogenizare se realizează la aceste mașini cu ajutorul unui torpedo (4), montat în cilindrul mașinii în imediata apropiere a matriței (3). Deplasarea semimatriței mobile (3) se realizează cu ajutorul pistonului (5), acționat hidraulic. Plastifierea materialului prelucrat se realizează în cilindrul (7) prevăzut cu rezistențele (6). Strângerea matriței se realizează, de asemenea, cu ajutorul pistonului (5).

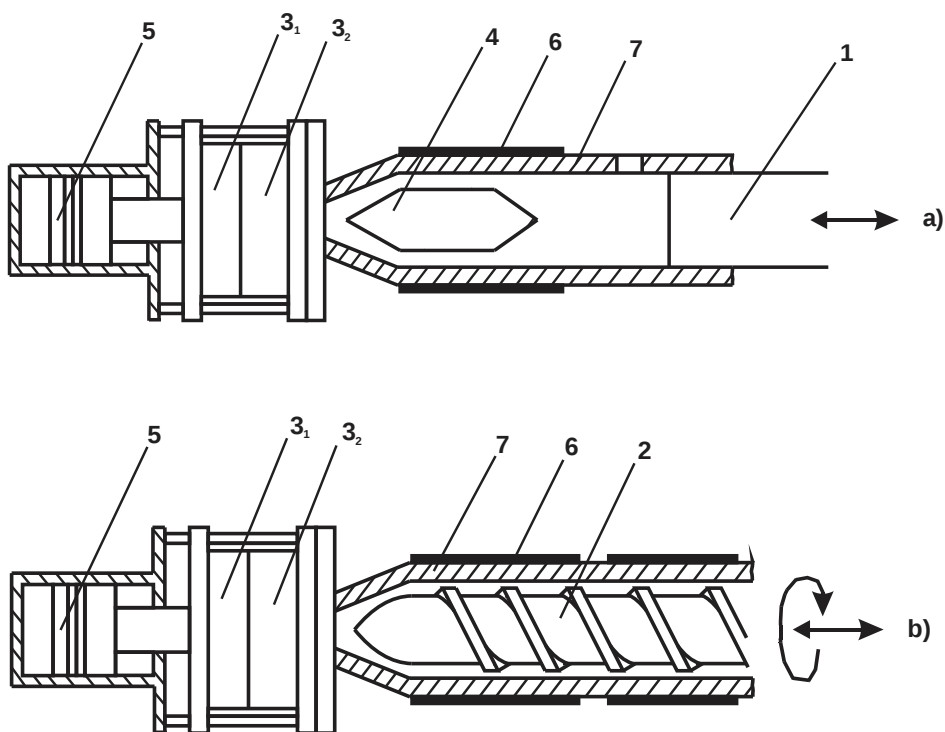


Figura 2.1. Schema de principiu a mașinilor de injecție cu piston (a) și cu melc-piston (b)

După cum s-a arătat mai sus, una din fazele importante ale formării prin injecție este introducerea topiturii în matriță. Această operație – injecția

– se realizează sub presiune, variația acesteia în timpul ciclului fiind foarte importantă, atât pentru funcționarea mașinii, cât și pentru calitatea produselor fabricate. Variația presiunii în timpul injecției constituie ciclul de injecție, care este reprezentat în figura 2.2, împreună cu o secțiune prin rețeaua de alimentare cu topitură a cuiburilor matriței.

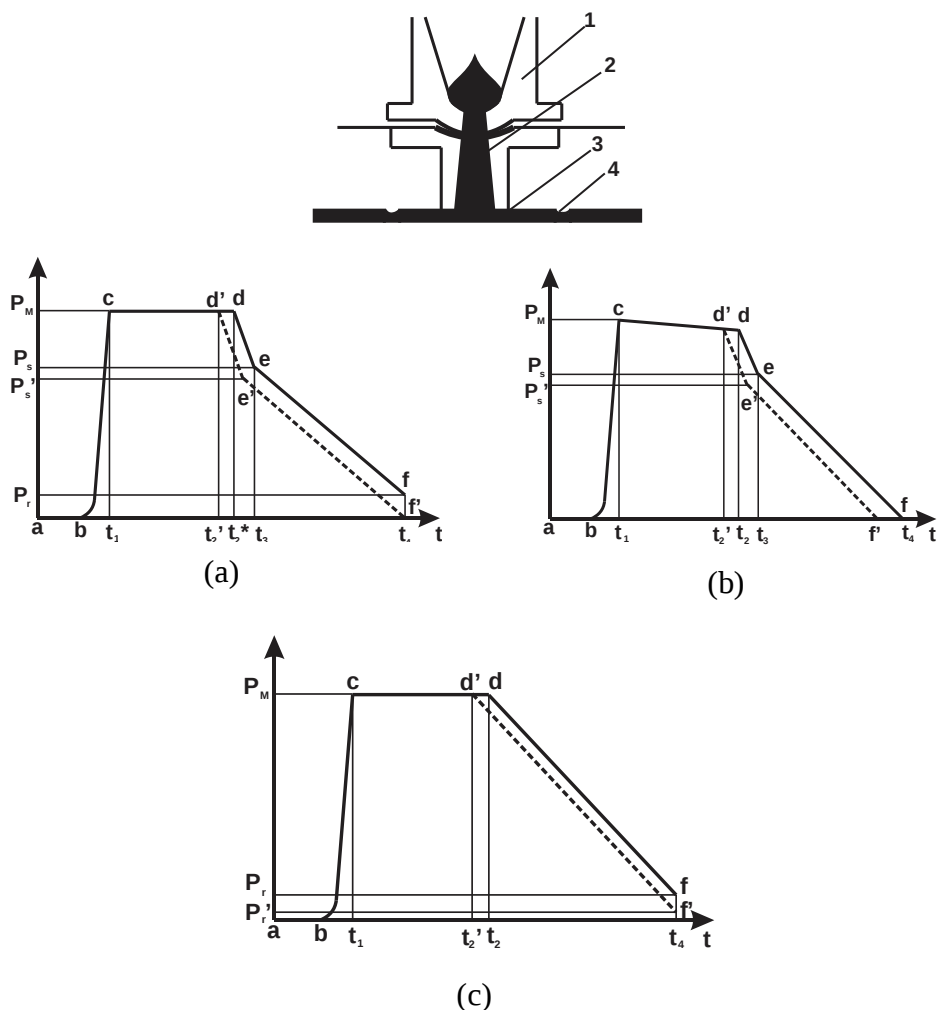


Figura 2.2. Rețeaua de alimentare și ciclul de injecție: 1 – duza de injecție; 2 – canalul principal de injecție; 3 – canal de curgere; 4 – orificiu de sigilare (puntiță).

Porțiunea a, b, c a ciclului constituie faza de umplere a matriței cu topitură, care se desfășoară la presiune atmosferică pe porțiunea ab și la presiune ridicată pe porțiunea bc . Faza de umplere se mai numește și fază de injecție, mai ales datorită porțiunii a doua când cuiburile matriței sunt umplute cu polimer la presiune maximă de injecție P_M .

În faza a doua, porțiunea cd , are loc compresia topiturii. Datorită răcirii are loc o contracție a topiturii, care este compensată printr-o creștere a presiunii. Această creștere a presiunii se realizează printr-o ușoară deplasare a pistonului. Dacă pistonul rămâne fix, în poziția de după injecție, solidificarea (răcirea) topiturii determină o scădere a presiunii (schema b).

În faza a treia a ciclului are loc „sigilarea” topiturii în cuiburile matriței și se numește faza de sigilare. La începutul acestei faze pistonul se retrage (punctul d), o parte din topitură curge invers prin rețeaua de alimentare și presiunea scade până când are loc solidificarea materialului în zona orificiului de sigilare. Aceasta zonă se caracterizează prin suprafața specifică cea mai mare și printr-o rezistență locală maximă. În figura 2.2. (c) se prezintă un ciclu pentru un polimer la care sigilarea se face mai greu din cauza vâscozității mici și deci a scăderii foarte pronunțate a presiunii de sigilare P_S . În acest caz, pe rețeaua de alimentare se montează un ventil, care are rolul să împiedice scăderea presiunii și deci să mențină topitura sub presiunea maximă de injecție până la solidificarea acesteia în cuiburi.

În faza a patra are loc răcirea sigilată a topiturii din cuiburile matriței până la presiunea reziduală P_r . Linia întreruptă din figura 2.2 reprezintă scăderea presiunii în scopul în care pistonul se retrage după un timp de compresie mai mic t_2' .

2.3. Considerații teoretice asupra procesului de injecție

În cele ce urmează se vor trata unele aspecte teoretice privind procesul de plastifiere și injecție. Astfel, se vor aborda problema variației presiunii în cilindrul mașinii și eficacitatea încălzirii, precum și unele aspecte asupra curgerii topiturii prin rețeaua de alimentare a matriței.

2.3.1. Procese în cilindrul mașinii

Cele ce urmează se referă mai ales la mașina cu piston, spre deosebire de mașina cu melc-piston care în privința procesului de plastifiere se aseamănă cu mașina de extrudare.

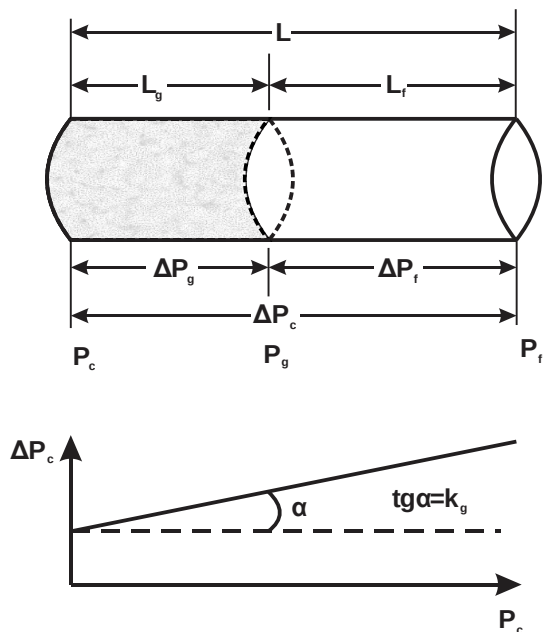


Figura 2.3. Variația presiunii materialului în lungul cilindrului de plastifiere și injecție

După cum s-a văzut din schema de principiu a mașinii cu piston, acesta acționează asupra granulelor și topiturii cu o presiune statică cunoscută P_c . Pentru a determina presiunea topiturii la intrarea în matriță este necesar să se calculeze căderile de presiune pe cilindru ΔP_c . Pentru curgerea staționară a granulelor de polistiren într-un cilindru de oțel s-a găsit ecuația:

$$P_g = P_c \exp\left(-\frac{4fL_g}{d}\right) \quad (2.1)$$

în care f este coeficientul de frecare, iar d diametrul cilindrului.

Căderea totală de presiune pe cilindrul mașinii va fi:

$$\Delta P_c = P_c - P_f = \Delta P_g + \Delta P_f \quad (2.2)$$

$$\Delta P_c = \left[1 - \exp\left(-\frac{4fL_g}{d}\right)\right] P_c + \Delta P_f = k_g P_c + \Delta P_f \quad (2.3)$$

de unde se vede că k_g este un coeficient care este o măsură a forțelor de frecare a granulelor.

Eficacitatea încălzirii cilindrului se definește prin:

$$E = \frac{T_m - T_i}{T_p - T_i} \quad (2.4)$$

în care T_m este temperatura medie a materialului, T_i este temperatura de intrare, iar T_p este temperatura peretelui cilindrului. Se observă că numărătorul din ecuația (2.4) reprezintă creșterea temperaturii dacă timpul de staționare al materialului în cilindru este finit (debit finit), iar numitorul reprezintă creșterea temperaturii materialului într-un interval de timp foarte mare (debit foarte mic de material prelucrat), așa cum se vede din figura 2.4.

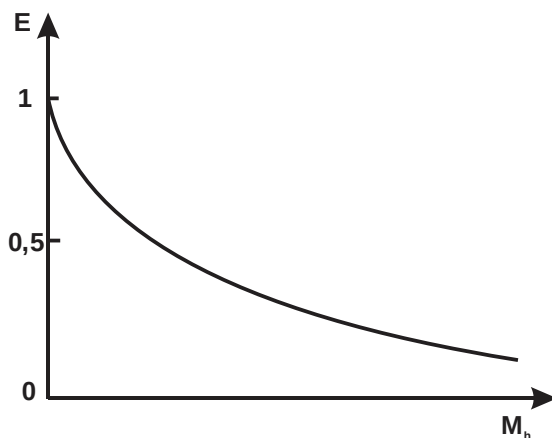


Figura 2.4. Variația eficienței încălzirii cu productivitatea mașinii de injecție

Deci, în funcție de eficiența încălzirii, de proiectarea cilindrului, se va determina capacitatea de producție a mașinii de injecție.

Cantitatea de căldură preluată de polimer depinde de:

- difuzivitatea termică a polimerului (a);
- durata de staționare (t);
- grosimea stratului de polimer (δ);
- diferența de temperatură.

Durata de staționare se poate determina din ecuația:

$$t = \frac{M}{M_i} = \frac{M}{M_c/t_c} = \frac{M \cdot t_c}{M_c} \quad (2.5)$$

în care M este masa polimerului din cilindru, M_c – debitul masic injectat la un ciclu, iar t_c este durata ciclului de injecție.

Pe de altă parte, rezolvând ecuația transferului de căldură, unidimensională, rezultă soluția sub formă grafică, dată în figura 2.6, în care s-a introdus și influența torpedoului ($1 \leq n \leq 2$). Deci avem dependența funcțională:

$$E = f\left(\frac{a \cdot t}{(5-n^2)\delta^2}\right) \Rightarrow \frac{a \cdot t}{(5-n^2)\delta^2} = k_e \quad (2.6)$$

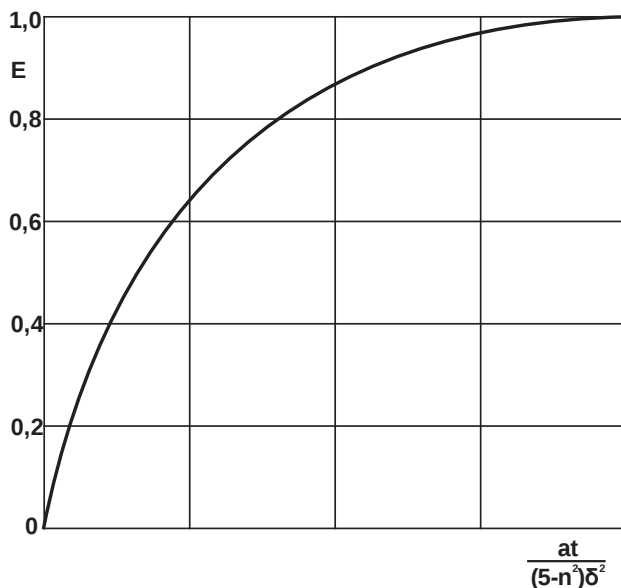


Figura 2.6. Variația eficacității cu caracteristicile polimerului (a), durata de staționare și grosimea stratului

În zona torpedoului, suprafața inelului de material prelucrat este:

$$S = \pi(D_1 + D_2)L \quad (2.7)$$

în care D_1 și D_2 sunt diametrele torpedoului și cilindrului, iar volumul va fi:

$$V = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2)L \quad (2.8)$$

încât raportul S/V este:

$$\frac{S}{V} = \frac{4\pi(D_1 + D_2)L}{\pi(D_1^2 - D_2^2)L} = \frac{4}{D_1 - D_2} = \frac{2}{\delta} \Rightarrow \delta^{-1} = \frac{S}{2V}; \delta = \frac{2V}{S} \quad (2.9)$$

Înlocuind în ecuația (2.6), obținem:

$$\frac{a \cdot M \cdot S^2}{M_i (5 - n^2) \cdot 4V^2} = k_\varepsilon$$
$$\frac{a \cdot V \cdot \rho \cdot S^2}{M_i (5 - n^2) \cdot 4V^2} = k_\varepsilon$$
$$M_i = K \cdot \frac{S^2}{V} \quad (2.10)$$

Deci, debitul mașinii de injecție determinat prin capacitatea de plastifiere M_i depinde de suprafața încălzită și caracteristicile de geometrie ale cilindrului.

2.3.2. Procese în matriță

Performanțele unei mașini de injecție depind de caracteristicile constructive ale mașinii, de durata ciclului de injecție și proprietățile materialului prelucrat.

„Capacitatea de prelucrare prin injecție” a unui polimer depinde în principal de proprietățile lui termice și reologice. Un material ideal pentru injecție trebuie să se topească într-un interval cât mai mic de temperatură și la o valoare redusă a acesteia și să producă o topitură neelastică, cu vâscozitate redusă și difuzivitate termică mare. În plus, densitatea ar trebui să fie puțin afectată de variațiile presiunii și ale temperaturii, iar materialul să poată fi încălzit la temperaturi suficient de mari fără să se degradeze termic.

Materialele care îndeplinesc cel mai bine condițiile de mai sus sunt unele aliaje metalice, dar polimerii se îndepărtează mult de la condițiile ideale de prelucrare prin injecție.

Unul din aspectele capacității de prelucrare prin injecție este „ușurința” cu care un polimer curge în matriță. Dacă considerăm, spre

exemplu, injecția unei topituri de polimer într-o cavitate cilindrică lungă, menținută la o temperatură constantă T_m , cu o presiune de injecție P_i și o temperatură de injecție T_i (ca în figura 2.7), atunci, deoarece $T_m < T_i$, topitura de polimer se răcește și curgerea se va opri când temperatura topiturii va atinge valoarea temperaturii de solidificare. Pentru o matriță dată și pentru un set dat de parametri de injecție (T_m , P_i , T_i), cantitatea de polimer care curge prin matriță până la solidificarea acestuia este o măsură a ușurinței cu care se realizează curgerea. Această cantitate este proporțională cu distanța limită până la care curge topitura, X .

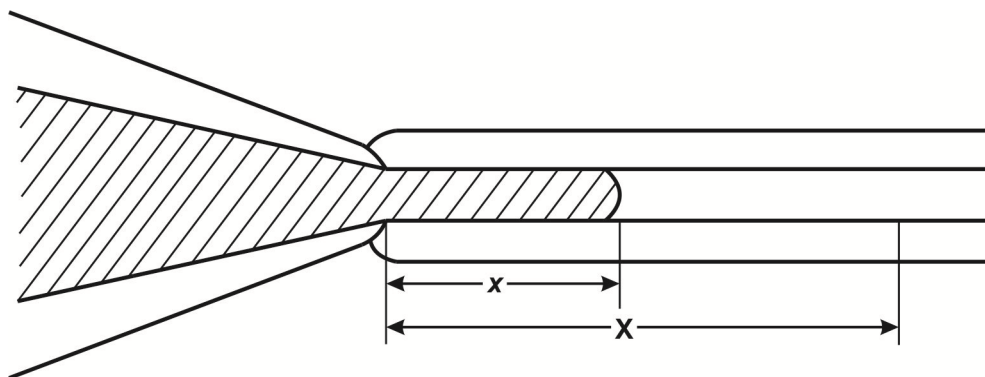


Figura 2.7. Curgerea unei topituri într-o cavitate cilindrică

Valoarea mărimii X depinde în principal de dependența vâscozitate-temperatură a topiturii de polimer și de difuzivitatea termică. Valori mari pentru X se obțin în cazul polimerilor cu vâscozitate mică și insensibili la variațiile de temperatură sau în cazul polimerilor cu difuzivitate termică mică. Trebuie precizat totuși că valori mari a mărimii X nu înseamnă în mod necesar și o bună capacitate de prelucrare prin injecție. Spre exemplu, dacă se obține o valoare mare pentru X din cauza unei difuzivități mici, atunci deși matrița se umple repede, ciclul total va fi mare din cauza timpului lung necesar pentru solidificarea topiturii.

Viteza de curgere a topiturii prin matriță poate fi descrisă de o ecuație de forma:

$$u = \frac{dx}{dt} = u_0 \exp(-t/\beta) \quad (2.11)$$

în care u_0 și β depind de natura matriței, proprietățile fizice ale polimerului și parametrilor de injecție.

Integrând ecuația (2.11) se obține:

$$x = u_0 \beta \left[1 - e^{-t/\beta} \right] \quad (2.12)$$

iar distanța maximă de prelucrare X este:

$$X = u_0 \beta \quad (2.13)$$

și depinde deci de cei doi parametri din ecuația (2.11).

Durata ciclului de injecție se poate calcula cu relația:

$$t_T = t_u + t_r + t_p \quad (2.14)$$

în care t_u este timpul de umplere, t_r – timpul de răcire, iar t_p este timpul mort.

Timpul de umplere se poate calcula cu ajutorul relației:

$$t_u = \int_0^L \frac{dl}{u} \quad (2.15)$$

Dacă se consideră că topitura de polimer respectă legea puterii:

$$\begin{aligned} \tau &= k \dot{\gamma}^n \Rightarrow \left(\frac{\tau}{k} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dx} \right) = \frac{du}{dx} \\ \Rightarrow du &= \left(\frac{\tau}{k} \right)^{1/n} \cdot dx \Rightarrow u = \frac{1}{k^{1/n}} \int_0^x \tau^{1/n} dx \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$t_u = \int_0^L \frac{dl}{\frac{1}{k^{1/n}} \int_0^x \tau^{1/n} dx} = \int_0^L \frac{dl}{\frac{1}{\eta} \int_0^x \tau^{1/n} dx} \quad (2.17)$$

Tensiunea de forfecare se poate determina din bilanțul forțelor, vezi figura 2.8.

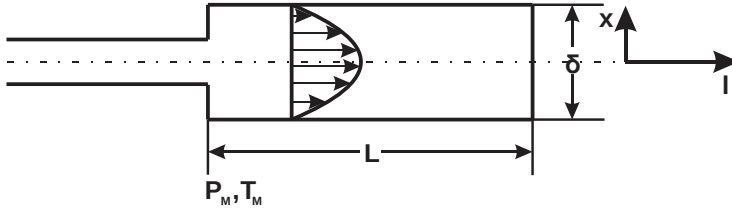


Figura 2.8. Secțiune în cavitatea matriței

$$p_M = \tau \cdot 2l \cdot B \quad (2.18)$$

Înlocuind pe τ din ecuația (2.18) în ecuația (2.17) și după integrare rezultă:

$$t_u = 2^{1/n} \left(\frac{L}{\delta} \right)^{\frac{n+1}{n}} \eta \cdot p_M^{-\frac{1}{n}} \quad (2.19)$$

Presiune p_M se explicitează din căderea relativă de presiune:

$$\Delta p_r = (p_c - p_M) / p_c \quad (2.20)$$

astfel că, în final avem:

$$t_u = 2^{1/n} \left(\frac{L}{\delta} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{\eta}{[(1 - \Delta p_r) p_c]^{1/n}} \quad (2.21)$$

Dacă se ține seama de variația vâscozității topiturii cu temperatura:

$$\eta = \eta_i \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \quad (2.22)$$

timpul de umplere va fi:

$$t_u = 2^{1/n} \left(\frac{L}{\delta} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{\eta_i \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_i} \right) \right]}{[(1 - \Delta p_r) p_c]^{1/n}} \quad (2.23)$$

Timpul de răcire se determină rezolvând ecuația transferului de căldură în condiții nestaționare:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.24)$$

care poate fi dată prin ecuația, în forma adimensională:

$$\frac{T - T_p}{T_M - T_p} \cong \frac{4}{\pi} \exp\left(\frac{\pi^2 a t}{\delta^2}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{\delta}\right) \quad (2.25)$$

Aplicând condițiile la limită:

$$x = 0, T = T_r \text{ (temperatura de răcire), } t = t_r \text{ (timpul de răcire)}$$

rezultă:

$$t_r = \frac{\delta^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \frac{T_M - T_p}{T_r - T_p} \right] \quad (2.26)$$

Timpul mort se determină din caracteristicile matriței și timpii necesari curățirii și altor operații auxiliare.

Timpul de răcire poate fi calculat și cu relația următoare care derivă de asemenea din integrarea ecuației (2.24):

$$t_r = \frac{\delta^2}{4,24 a^2} \left(\lg 0,81 - \lg \frac{T_{DC} - T_p}{T_M - T_p} \right) \quad (2.27)$$

unde T_{DC} este temperatura de deformare sub acțiunea căldurii a materialului plastic.

2.3.3. Influența presiunii și a temperaturii

Pentru polimerii amorfi se poate scrie o ecuație de stare în forma:

$$(p + p_i)(V - V_i) = R'T \quad (2.28)$$

în care P este presiunea, V , volumul specific, T , temperatura, iar p_i , v_i și R' sunt constante ale polimerului.

Ecuația de stare (2.28) arată că pentru densitate constantă, presiunea variază liniar cu temperatura, așa cum se vede din figura 2.9.

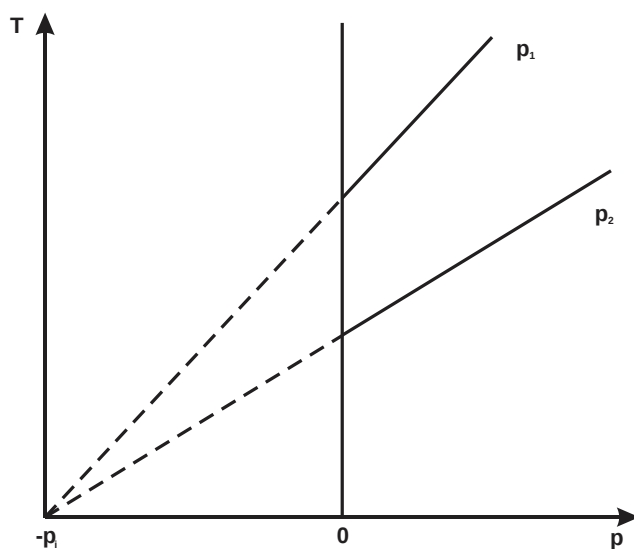


Figura 2.9. Diagrama $p - T$

Presiunea este egală cu $-p_i$ când temperatura este 0 K, deci toate dreptele de densitate constantă se întâlnesc în același punct.

Diferitele faze ale ciclului de injecție pot fi puse în evidență și pe diagrama $p - T$, așa cum se vede în figura 2.10:

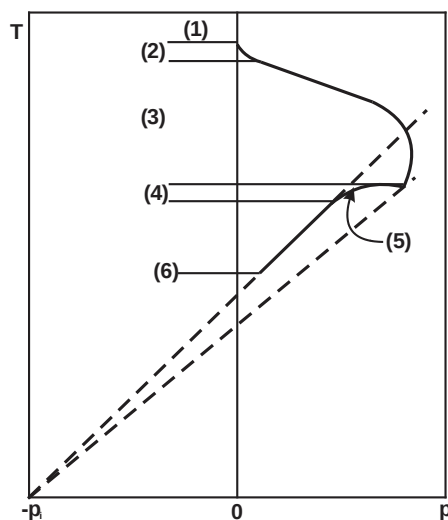


Figura 2.10. Diagrama $p - T$ a ciclului de injecție: (1) – timpul mort; (2) – umplerea; (3) – compresia; (4) – descărcarea; (5) – sigilarea; (6) – răcirea sigilată.

2.4. Construcția mașinilor de injecție

2.4.1. Clasificarea mașinilor de injecție

- a) După capacitatea mașinii
- b) După modul de acționare a ansamblului de închidere a matriței:
 - manuale;
 - pneumatice;
 - hidraulice;
 - electromecanice;
 - mecanohidraulice.
- c) După direcția de închidere a matriței:
 - orizontale;
 - verticale;
 - orizontal-verticale.
- d) După sistemul de comandă:
 - manuale;
 - semiautomate;
 - automate.
- e) După agregatul de plastifiere și injecție (vezi paragraful corespunzător)
- f) După numărul matrițelor (cu una sau mai multe matrițe)

2.4.2. Componenta mașinilor de injecție

Părțile componente mai importante ale unei mașini de injecție sunt:

- batiul;
- agregatul de plastifiere și injecție;
- matrița;
- ansamblul de închidere al matriței;
- dispozitivul de alimentare și dozare;
- sistemul de încălzire și reglare a temperaturii;
- sistemul de răcire;
- aparatura de automatizare și control.

2.4.2.1. Batiul

Batiul mașinilor de injecție se poate executa din fontă cenușie sau din profile (din tablă) de oțel. Pe batiu se montează în general toate celelalte părți ale mașinii, mai puțin uneori, tabloul de comandă, care poate fi constituit sub forma unui dulap separat.

2.4.2.2. Ansamblul de închidere a matriței

Acest ansamblu realizează închiderea, deschiderea sau strângerea formei. Forța de închidere sau de strângere a matriței trebuie să se opună forței de distanțare creată de presiunea topiturii injectate în matriță, care poate să varieze în limitele 1000–2000 bar. Forța de distanțare se calculează cu formula:

$$F_d = k \cdot p_M \cdot A \quad (2.29)$$

în care k este un coeficient egal cu 0,3 – 0,5 pentru mașini de injecție cu piston și 0,5 – 0,7 pentru cele cu melc-piston, iar A este aria efectivă a proiecției piesei în planul de separație a matriței.

Forța efectivă de strângere este:

$$F_{ef} = (1,2-1,3)F_d \quad (2.30)$$

Acționarea ansamblului de închidere a matriței poate fi făcută pneumatic (până la forțe de închidere de 15 tf), mecanic, hidraulic sau hidromecanic. Acționările mecanice se folosesc la mașini de injecție de capacitate mică.

Cel mai frecvent se folosesc la mașinile moderne sistemele de acționare hidromecanice.

În figura 2.11 se prezintă un sistem de închidere cu genunchi dublu.

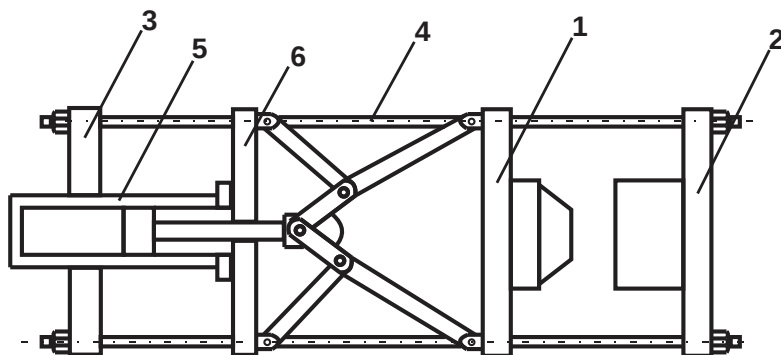


Figura 2.11. Mecanism de închidere a matriței cu acțiune hidrodinamică

Cele două semimatrițe sunt fixate pe platoul mobil (1) și pe cel fix (2), acesta din urmă formând un sistem rigid împreună cu traversa (3) și coloana (4). Cu ajutorul cilindrului hidraulic (5) și a pârghiilor (6) se realizează deplasarea platoului mobil (1) și strângerea matriței.

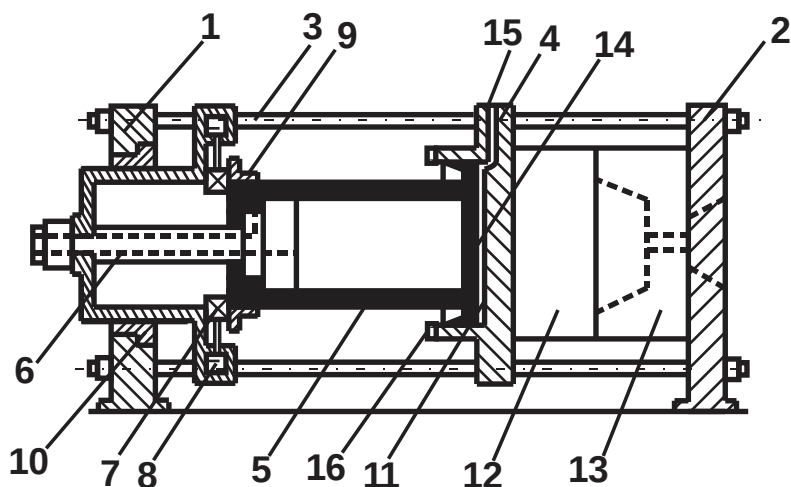


Figura 2.12. Mecanism hidraulic de închidere a matriței (matrița este închisă și strânsă)

În figura 2.12 este prezentat un sistem complet hidraulic pentru închiderea și strângerea matriței. Piese componente sunt montate pe sistemul rigid format din traversa (1), platoul fix (2) și coloanele (3) care la rândul lor sunt montate pe batiul mașinii.

Deplasarea platoului mobil (4) se realizează cu ajutorul cilindrului (5), iar strângerea matriței cu ajutorul pistonului (14) care face corp comun cu cilindrul (5) prin două canale practicate în pistonul fix (6). După închiderea matriței (12) (13), strângerea acesteia se realizează cu ajutorul uleiului de înaltă presiune, care se trimite prin racordul (15) în spațiul (11), realizându-se astfel un consum minim. Oprirea deplasării platoului mobil, în operația de strângere a matriței se realizează cu ajutorul inelului opritor (16). De asemenea, cu ajutorul semiineleilor (7), comandate de cilindrul hidraulic (8) se realizează blocarea cilindrului (5), înaintea operației de strângere a matriței. Reglarea poziției platoului mobil și a înălțimii matriței se realizează cu ajutorul bucșii de reglare (10), montată în traversa (1).

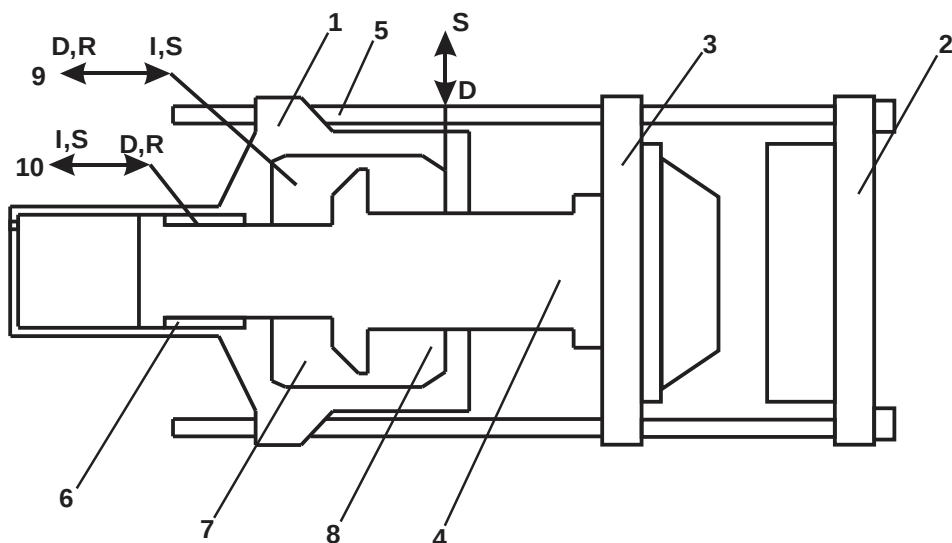


Figura 2.13. Mecanismul hidraulic de închidere și strângere a matriței:
I – închiderea matriței; D – deschiderea matriței; S – strângerea matriței;
R – retragerea matriței.

Un alt sistem hidraulic este prezentat în figura 2.13. Traversa-cilindru (1), platoul fix (2) și colanele (5) formează sistemul solidar asupra căruia se transmit forțele. Platoul mobil (3) este deplasat cu ajutorul pistonului diferențial (4). Închiderea matriței se realizează cu ajutorul camerei de închidere (7), în care se transmite uleiul prin racordul (9). Consumul de ulei în operația de închidere este mic, aproximativ egal cu volumul cilindrului de deschidere (6). La capătul cursei pistonului (4) are loc deplasarea acestuia pe porțiunea camerei (7) cu diametrul mic, realizându-se astfel etanșarea, presiunea uleiului acționând numai pe fața cu secțiunea mare, producând astfel forța de strângere necesară.

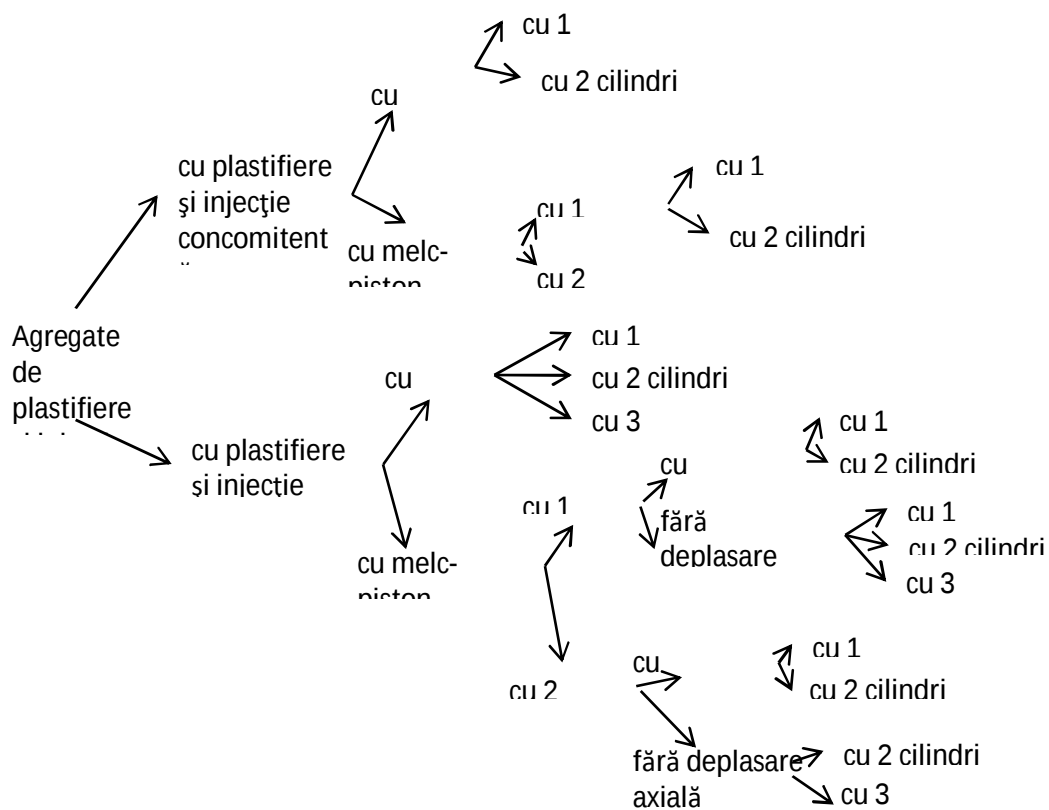
Deschiderea și retragerea matriței se realizează cu ajutorul camerei de deschidere (6).

Dintre avantajele acestui sistem se pot menționa:

- forță constantă, independent de partea mecanică;
- forțele de strângere pot fi reglate de la o valoare minimă la una maximă;
- dispozitive de siguranță pentru creșterile de presiune;
- consum mic de ulei (1 – 2 litri pe ciclu);
- întreținere foarte ușoară;
- cursă reglabilă;
- lubrifierea ușoară;
- forțele de deschidere mari.

2.4.2.3. Agregatul de plastifiere și injecție

Agregatul de plastifiere și injecție realizează plastifierea materialului, omogenizarea topiturii și injectarea acesteia în cuiburile matriței. Clasificarea prezentată în figura 2.14 reflectă diversitatea mare a acestor agregate la mașinile de injecție moderne.



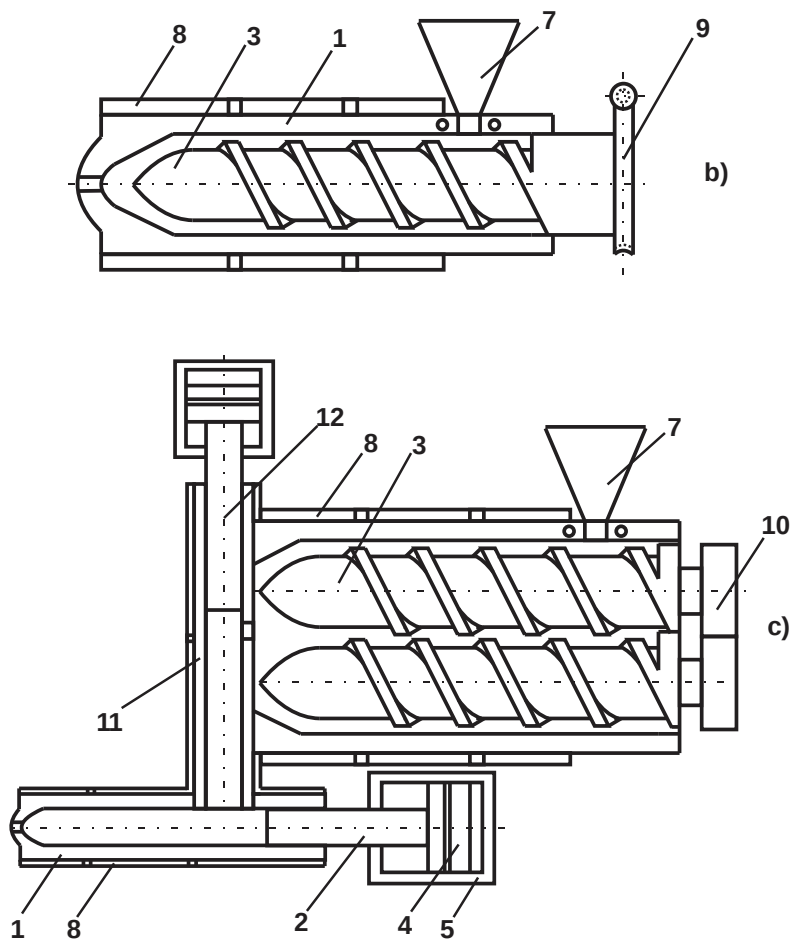


Figura 2.15. Agregate de plastifiere și injecție: a) cu piston; b) cu melc-piston; c) cu 3 cilindri și 2 melci, fără deplasare axială. 1 – cilindru de injecție; 2 – piston de injecție; 3 – melc-piston; 4 – piston pentru deplasarea pistonului de injecție; 5 – cilindru hidraulic; 6 – torpedo; 7 – pâlnie de alimentare; 8 – rezistențe electrice; 9 – angrenaj ax-roată melcată; 10 – roți dințate; 11 – cilindru de transfer; 12 – piston pentru transferul topiturii.

În figura 2.15 sunt prezentate trei exemple de agregate de plastifiere și injecție. Primele două sunt dintre cele mai simple constructiv, iar ultimul

exemplu, deși mai complicat se caracterizează prin performanțe superioare, cum sunt omogenizarea deosebită și utilizarea mai eficientă a timpului.

Acționarea melcului-piston poate fi făcută pe cale hidraulică sau electrohidraulică după cum rotirea și deplasarea axială se realizează hidraulic sau electric-hidraulic, așa cum se vede în figura 2.16, unde se prezintă schema acționării hidraulice. Mișcarea de rotație se transmite de la motorul hidraulic (3) prin intermediul roților dințate (1) și (2), iar mișcarea de deplasare axială se transmite de la cilindrul hidraulic (4). În cazul acționărilor electro-hidraulice, mișcarea de rotație se transmite de la un motor electric.

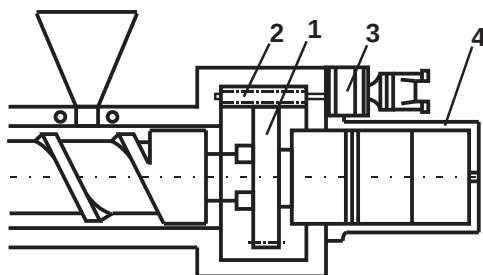


Figura 2.16. Acționarea hidraulică a melcului-piston

Funcționarea mașinilor de injecție, mai ales cele cu melc-piston, este similară cu cea a mașinilor de extrudare, motiv pentru care părțile componente mai importante – cilindrul, pistonul, melcul-piston – se execută ca și cilindrul și melcul mașinilor de extrudare.

Torpedoul, montat frecvent în cilindrul mașinilor cu piston, este o piesă hidrodinamică, eventual prevăzut cu aripioare, are rolul să producă o intensificare a proceselor de transfer în vederea asigurării unei omogenizări finale a topiturii, înaintea injectării acestuia în matriță. Se montează înaintea duzei de injecție și poate fi încălzit.

Lungimea relativă a melcilor la agregatele cu melc-piston este cuprinsă în limitele 10 – 15, iar raportul de compresie 2,5 – 2. Turația

melcului este în general aceeași cu a melcilor mașinilor izoterme, existând tendința de creștere a acesteia peste valoarea de 100 rotații/minut.

Duza de injecție este o piesă care se montează la capătul cilindrului de injecție, fiind prevăzută cu un ajustaj prin care se injectează topitură în matriță. Duzele pot fi în general închise sau deschise. Primele se folosesc în cazul materialelor cu vâscozitate mică și se deschid în general înaintea injecției sub acțiunea presiunii topiturii.

În figura 2.17 se prezintă trei tipuri de duze, normală (a), cu conicitate inversă (b), utilizată la materialele cristaline și una cu amestecare intensivă (c).

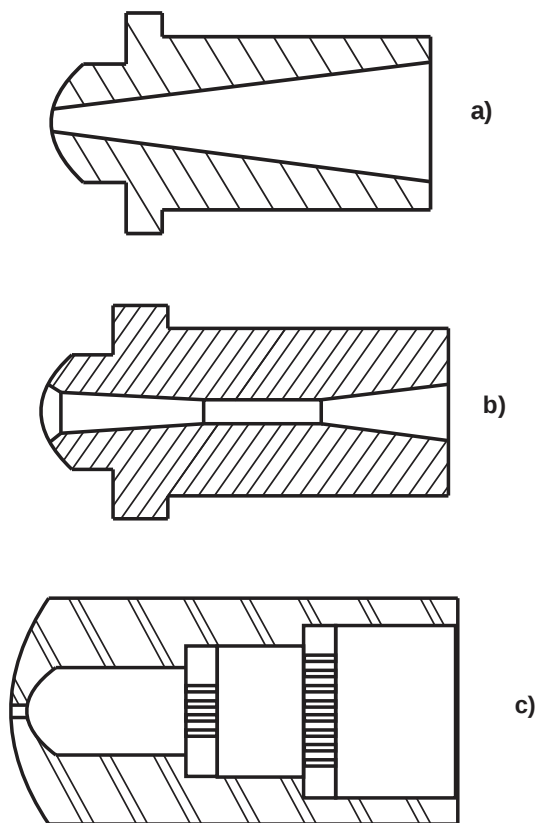


Figura 2.17. Duze de injecție de tip deschis

Matrița este un ansamblu de piese care este caracteristic produsului finit fabricat, și nu mașinii de injecție. Părțile componente mai importante sunt:

- de formare;
- de fixare;
- de ghidare;
- rețeaua de alimentare;
- de aruncare;
- auxiliare, etc.

Plăcile de formare sunt părțile cele mai importante ale unei matrițe și se construiesc din oțeluri rezistente și cu suprafața prelucrată fin și dură. În cazul unor piese foarte fine, piese filigrane, plăcile de formare pot fi construite din bronz. În cazul pieselor mici, părțile de formare se constituie sub forma unor pastile montate în plăci sau sub formă de bacuri la piesele mai complicate.

Fixarea elementelor matriței se face pe plăci de fixare. Ghidarea celor două semimatrițe se realizează cu ajutorul coloanelor, bușelor de ghidare și a unor știfturi. Părțile de aruncare servesc la aruncarea automată a pieselor când se deschide matrița.

Rețeaua de alimentare trebuie să fie cât mai scurtă și cu un număr cât mai mic de coturi, pentru a se reduce pierderile de presiune și temperatură în timpul injecției. Este formată din:

- canalul principal de injecție;
- canale secundare de curgere;
- punți sau orificii de sigilare.

În cazul matrițelor cu număr foarte mare de cuiburi, dispunerea acestora se poate face în mai multe planuri, astfel încât sunt necesare canale secundare de injecție. Dacă rețeaua de alimentare este prea lungă, o parte din aceasta (canalele secundare de injecție) poate să fie încălzită.

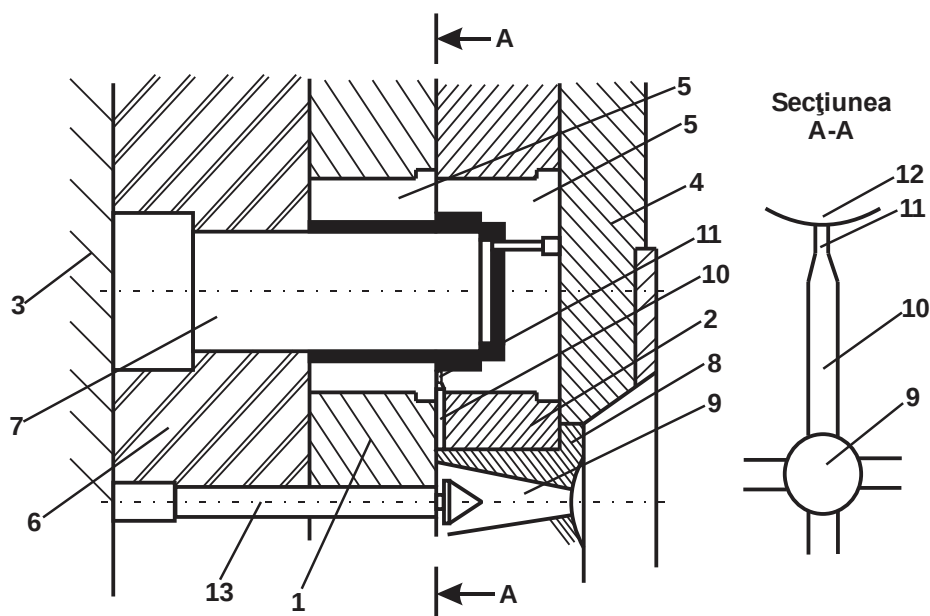


Figura 2.18. Secțiune în jurul unui cuib dintr-o matriță

După cum se vede din figura 2.18, părțile de formare, plăcile (1) și (2), în care sunt dispuse pastilele se găsesc de o parte și de alta a planului de separație A – A, fiind montate pe două plăci de prindere (3) și (4). Golul interior al piesei este dat de miezul (7) care străbate placa intermediară (6). Topitura se injectează prin duza (8), rețeaua de alimentare fiind formată din canalul de injecție (9), canalele de curgere (10), care se ramifică la fiecare cuib al matriței și punțița (11), care are rolul orificiului de sigilare a cilindrului (12). Pentru scoaterea produsului din canalul de injecție, matrița este prevăzută cu coloana de reținere (13).

Proiectarea unei matrițe presupune parcurgerea următoarelor etape:

- Studiul produsului (alegera materialului, stabilirea planului de separație);
- Așezarea piesei față de planul de separație;
- Stabilirea numărului de cuiburi;

- d) Determinarea forței de închidere a matriței;
- e) Stabilirea punctului de injecție;
- f) Trasarea rețelei de alimentare;
- g) Stabilirea dimensiunilor aproximative ale punțiței, care se vor corecta la proba matriței;
- h) Stabilirea dimensiunilor cuiburilor, în funcție de coeficienții de contracție;
- i) Calculul de rezistență a diferitelor părți ale matriței.

Canalele de curgere și punțița se execută cu secțiunea trapezoidală, de regulă într-o singură placă de formare, așa cum se vede în figura 2.19.

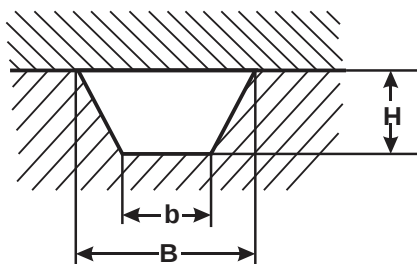


Figura 2.19. Secțiune prin canalul de curgere

Pentru piese de până la 10g, dimensiunile secțiunii unui canal de curgere și ale punțiței sunt:

- Canalul de curgere: $B=5\text{mm}$, $b=4\text{mm}$, $H=4\text{mm}$
- Punțița (orificiul de sigilare): $B=0,8\text{mm}$, $b=0,6\text{mm}$, $H=0,6\text{mm}$, $L=1,5 - 2\text{mm}$

2.5. Probleme de calcul la mașinile de injecție

2.5.1. Coeficientul de contracție

Coeficientul de contracție liniară sau volumică se definește cu relațiile:

$$\beta_L = \frac{L^* - L}{L^*}; \beta_v = \frac{V^* - V}{V^*} \quad (2.31)$$

în care L^* , V^* și L , V sunt lungimi și volume pentru matriță și obiectul fabricat.

Coeficientul de contracție liniară mediu se poate calcula în funcție de volume:

$$\bar{\beta}_L = 1 - \frac{\bar{L}}{\bar{L}^*} = 1 - \sqrt[3]{\frac{V}{V^*}} = 1 - \sqrt[3]{\frac{1/\rho}{1/\rho^*}} \quad (2.32)$$

Dacă ținem seama de ecuația de stare (2.28) în forma:

$$(p + p_i) \left(\frac{1}{\varphi^*} - V_i \right) = R'T \quad (2.33)$$

se obține final coeficientul mediu de contracție:

$$\beta_L = 1 - \sqrt[3]{\frac{p + p_i}{\rho [R'T + V_i (p + p_i)]}} \quad (2.34)$$

În tabelul 2.1 se dau valorile constantelor necesare calculării coeficientului de contracție.

Tabelul 2.1. Constante de material

Polimer	p_i	v_i	R'
Polietilenă M/2	47600	0,875	43
Polietilenă M/7	47600	0,875	43
Polietilenă M/20	47600	0,875	43
Polistiren (.....)	27000	0,822	11,6
Polistiren (.....)	27000	0,822	11,6

2.5.2. Productivitatea

Productivitatea se poate calcula cu relația:

$$M_h = k \cdot N \cdot V \cdot l \langle \text{kg} / \text{h} \rangle \quad (2.35)$$

în care:

k – factorul de utilizare al timpului;

N – numărul ciclurilor de injecție pe oră;

V – volumul de material injectat la un ciclu, m^3 ;

ρ – densitatea materialului, kg/m^3 .

$$k = \frac{t - t' N'}{t} \quad (2.36)$$

în care:

t – fondul de timp;

t' – durata schimbării matriței;

N' – numărul de schimbări de matriță în timpul t .

Volumul de material injectat sub formă de produse este:

$$V = k_1 V_1 \quad (2.37)$$

în care V_1 este capacitatea reală a mașinii, iar k_1 este un coeficient care ține seama de dimensiunea produsului, care influențează mărimea produsului. Acest coeficient are valori între 0,6 și 0,9.

2.5.3. Capacitatea de plastifiere a melcului-piston

Capacitatea de plastifiere a melcului-piston poate fi calculată cu formula:

$$M_p = M_1 - M_2 - M_3 \quad (2.38)$$

și poate fi corelată cu productivitatea. Evident aceasta din urmă poate fi cel mult egală cu prima. În formula de mai sus, M_1 , M_2 și M_3 sunt debitele în direcția de injecție, în sens invers și scăpările peste spirele melcului.

$$M_1 = \alpha N = \frac{n\pi DH \left(\frac{t}{n} - l \right) \cos^2 \alpha}{2} \cdot N \quad (2.39)$$

$$M_2 = \frac{\beta \Delta p}{\eta} = \frac{nH^3 \left(\frac{t}{n} - l \right) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \Delta p}{12 \cdot L \cdot m \cdot \eta} \quad (2.40)$$

$$M_3 = \frac{\gamma \cdot \Delta p}{\eta} = \frac{\pi \cdot D \cdot \delta^3 \cdot E \cdot \Delta p}{12 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \eta} \quad (2.41)$$

în care:

n – numărul de începuturi a filetelui melcului;

D – diametrul melcului;

t – pasul filetelui;

H – adâncimea canalului melcului;

l – lățimea spirei melcului;

α – unghiul de înclinare a spirei;

L_m – lungimea medie a melcului;

δ – jocul dintre spire și cilindru;

E – coeficient de excentricitate ($E \approx 1,2$).

$$L_m = L - \frac{l}{2} \quad (2.42)$$

unde L este lungimea totală de lucru a melcului și l deplasarea axială a melcului la plastifiere.

În funcție de capacitatea de plastifiere se poate calcula productivitatea mașinii:

$$M_h = \frac{M_p \cdot t_p}{t_c} \quad (2.43)$$

unde t_p este durata de plastifiere pentru o injecție, iar t_c este durata ciclului de injecție.

2.5.4. Puterea de acționare a melcului-piston

$$N_a = \frac{\pi^3 D^3 N^2}{H} L\eta_m + \frac{M_1 \sum \Delta p}{\cos^2 \alpha} + \frac{\pi^2 D^2 N^2 l}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} L\eta_m \quad (2.44)$$

în care η_m este vâscozitatea dinamică medie a topiturii, iar $\sum \Delta p$ este căderea de presiune totală pe lungimea medie a melcului L_m , iar restul mărimilor au semnificația de mai sus.

2.5.5. Cantitatea de căldură necesară încălzirii și plastifierii materialului

$$Q = M \cdot C_p (t_f - t_i) \quad (2.45)$$

în care:

M – masa materialului introdusă în cilindru;

C_p – căldura specifică a materialului;

t_i, t_f – temperaturile, inițială și finală, ale materialului din cilindru.

Cu aceasta se poate calcula suprafața încălzită a cilindrului, din formula:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta t_m \cdot \tau_c \quad (2.46)$$

unde τ_c este durata unui ciclu de injecție.

Bibliografie

Lungu, Maria; Petrovan, Simion, *Utilaje pentru prelucrarea polimerilor*, Institutul Politehnic Iași, 1980

Tudose, Radu Z., *Procese și utilaje în industria de prelucrare a compuşilor macromoleculari*, Editura Tehnică, București, 1976

Feldman, D.; Rusu, M., *Tehnologia prelucrării polimerilor. Prelucrarea materialelor plastice*, Institutul Politehnic Iași, 1977

Renert, M., *Calculul și construcția utilajului chimic*, vol. II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1971

Volintiru, T.; Ivan, Gh., *Bazele tehnologice ale prelucrării elastomerilor*, Editura Tehnică, București, 1974

Manovicu, I., *Utilaje pentru prelucrarea compuşilor macromoleculari*, Institutul Politehnic Timișoara, 1974

Mihail, R.; Goldenberg, N., *Prelucrarea materialelor plastice*, Editura Tehnică, București, 1963

Iordache, Gheorghe; Iatan, I. Radu; Ene, Gheorghe; Păunescu, Mihaela; Voicu, Ion, *Utilaje pentru industria chimică și petrochimică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982

S. Petrovan, M. Lungu (1989), *Îndrumar pentru elaborarea proiectelor la disciplina Ingineria reacțiilor chimice și utilaje specifice*, Rotaprint, I.P.Iași.

J. R. Wagner Jr., E. M. Mount III, H. F. Giles Jr. (2013), *Extrusion: the definitive processing guide and handbook*, Second Edition, William Andrew – Elsevier, eBook ISBN: 9781437734829

J.F. Agassant, P. Avenas, J.-Ph. Sergent (1986), *La mise en forme des matiers plastiques*, II-eme ed., Tech &Doc., Lavoisier, Paris.

E. Tempelman, H. Shercliff, B. Ninaber van Eyben (2014), *Manufacturing and Design. Understanding the Principles of How Things Are Made*, First Edition, Butterworth Heinemann Elsevier Limited, Oxford

R.C. Progelhof, J.L.Thorne (1993), *Polymer Engineering Principles, Properties, Processes and Tests for Design*, Hanser Publ. Munich, Vienna, NY., Barcelona.

F. Hensen, W. Knappe, H. Potente (1988), *Plastic Extrusion Technology*, Hanser Publ., Munich, Vienna, New York.