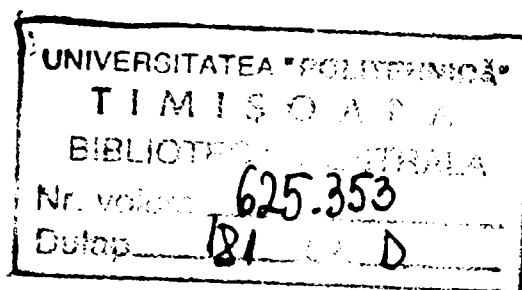


Inginer Daniel V. STAN

**Studiul activării ultrasonice a proceselor de injectare și extrudare  
a materialelor termoplastice**

- teză de doctorat în cotutelă -



**Conducători științifici:**

Prof.dr.ing. Tudor ICLĂNZAN

Universitatea POLITEHNICA, Timișoara

Prof.dr.ing. Marc J. M. ABADIE

Director al laboratorului LEMP/MAO  
USTL Montpellier, Franța

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICĂ"  
TIMIȘOARA

Timisoara 1999

# Cuprins

<b>Introducere</b>	<b>4</b>
<b>1. Proprietățile materialelor polimerice și influența lor asupra comportării reologice a topiturii</b>	
✓ 1.1. Natura și structura materialelor polimerice.	9
1.2. Structura supramoleculară a polimerilor.	17
✓ 1.3. Modelarea matematică a curgerii topiturilor de polimeri prin secțiuni finite.	
✓ 1.3.1. Considerații generale.	19
1.3.2. Comportamentul newtonian al fluidelor.	22
1.3.3. Fluide ne-newtoniene. Modelul Oswald de Waele.	23
1.3.4. Ecuații pentru corelarea proprietăților fizice cu parametrii curgerii.	30
✓ 1.3.5. Model matematic pentru curgerea cu alunecare la perete.	33
✓ 1.4. Influența condițiilor de procesare asupra calității produselor.	
1.4.1. Defecte ale produselor extrudate.	38
1.4.1.1. Clasificare. Condiții de manifestare.	38
1.4.1.2. Oscilații de relaxare (piezodependența).	42
1.4.1.3. Viteza de alunecare la perete.	45
1.4.2. Influența proprietăților suprafeței active a dispozitivului de punere în forma asupra vâscozității aparente.	49
✓ 1.4.3. Efectul cotei de gabarit a secțiunii de curgere (intrefer) asupra proprietăților reologice ale topiturii.	53
1.4.4. Efectul presiunii asupra vâscozității aparente.	57
✓ 1.4.5. Efectul temperaturii asupra vâscozității aparente.	59
1.4.6. Influența compresibilității topiturii asupra comportării reologice.	60
1.5. Reometre capilare.	62
✓ 1.6. Concluzii.	64
<b>2. Injectarea și extrudarea materialelor polimerice</b>	
✓ 2.1. Considerații generale.	66
✓ 2.2. Matrite pentru injectarea materialelor polimerice. Soluții constructive.	67
2.3. Extrudarea materialelor termoplaste. Soluții constructive pentru filierele de extrudare.	74
✓ 2.4. Termostatarea dispozitivelor pentru procesarea materialelor polimerice.	77
✓ 2.5. Concluzii.	80

<b>3. Posibilitatea aplicării ultrasunetelor la activarea proceselor de transformare a materialelor polimerice</b>	
3.1. Principiile activării ultrasonice.	82
3.2. Mărimi caracteristice.	83
3.3. Sistemul pentru activarea cu ultrasunete.	87
3.3.1. Generatorul de ultrasunete.	87
3.3.2. Blocul sonic (convertorul). Soluții constructive și performante.	88
3.3.2.1. Transductori.	89
3.3.2.2. Materiale pentru transductoare magnetostrictive.	89
3.3.2.3. Materiale pentru transductoare piezoelectrice.	92
3.3.2.4. Concentratorul.	94
3.4. Efecte posibile în cazul activării ultrasonice a materialelor polimerice plastificate.	
3.4.1. Efectul de suprafață (efectul de reducere a frecării).	96
3.4.2. Inmuierea acustică.	97
3.4.3. Absorbția energiei undei ultrasonice.	98
3.5. Concluzii.	105
<b>4. Aplicații posibile. Obiectivele cercetării</b>	106
<b>5. Proiectarea și realizarea standului experimental pentru activarea ultrasonica a proceselor de curgere a materialelor vâscoelastice</b>	
5.1. Cerințe privind parametrii de exploatare.	112
5.2. Soluția tehnică de realizare a standului experimental.	113
5.2.1. Stabilirea intervalului de valori pentru temperatura de lucru.	114
5.2.2. Stabilirea ordinului de mărime pentru debit și presiune de extrudare.	114
5.2.3. Stabilirea volumului cilindrului de plastifiere și a ordinului de mărime pentru timpul de extrudare.	115
5.2.4. Stabilirea gamei de valori pentru interstițiul (intrefier) de curgere.	116
5.2.5. Stabilirea geometriei duzei de extrudare.	116
5.3. Descrierea standului experimental.	118
5.3.1. Sistemul pentru activarea cu ultrasunete.	118
5.3.1.1. Generatorul de ultrasunete.	120
5.3.1.2. Blocul sonic.	121
5.3.1.3. Sistem de răcire a blocului sonic.	122
5.3.2. Sistemul pentru plastifierea materialului polimeric, controlul temperaturii și prelevare de date.	123
5.3.3. Sistemul de separare - marcarea.	125
5.3.4. Sistem de alimentare și schema de comanda, control și protecție.	125

<b>6. Experimentul factorial. Proiectarea programului de experimentare</b>	
6.1. Experimentul factorial ca instrument de cercetare științifică.	126
6.2. Proiectarea programului de experimentare	131
<b>7. Rezultate experimentale</b>	
7.1. Incercări preliminare	
7.1.a. Stabilirea frecvenței de rezonanță pentru ansamblele ultrasonice folosite	134
7.1.b. Stabilirea preciziei temporizării pentru mecanismul de separare	135
7.1.c. Stabilirea influenței geometriei subansamblului vârf concentrator-suprafață interioară duza.	135
7.1.d. Ordonanțarea factorilor de influență după efectul lor asupra variabilei de răspuns - cantitate de material extrudat	136
7.2. Incercări selective	
7.2.1. Efectul activării ultrasonice asupra debitului extrudat. Viteza de alunecare la perete	139
7.2.2. Studiul activării ultrasonice ca factor de influență	146
7.2.3. Efectul de suprafață în cazul activării ultrasonice	153
7.2.4. Efectul termic al activării ultrasonice	156
7.2.5. Influența interstiului de curgere asupra intensității efectului activării ultrasonice.	163
7.2.6. Influența presiunii asupra intensității efectului activării ultrasonice	164
7.2.7. Efectul activării ultrasonice asupra structurii supramoleculare a extrudatului.	165
<b>8. Concluzii generale</b>	171
<b>9. Contribuții personale</b>	176
<b>10. Bibliografie</b>	177
<b>ANEXE</b>	183

## Introducere

Dezvoltarea sistemelor de producție și a domeniilor de activitate industrială, în special în ramura construcțiilor de mașini, presupune soluționarea problemei calității și competitivității în condițiile unor piețe de desfacere exigente.

În domeniul tehnologiilor mecanice clasice, procedeele de punere în formă a materialelor polimerice (plasturgia) și tehnologiile de elaborare și prelucrare a compozitelor (ca și domeniu conex) au cunoscut în ultimele decenii o dezvoltare spectaculoasă determinată tocmai de cerințele pieței, de materia prima ieftină și accesibilă și de simplitatea principiilor de prelucrare a acestora.

Majoritatea precedeelor de prelucrare a materialelor polimerice sunt caracterizate de limitări ale vitezei de producție datorită posibilității apariției defectelor asociate declanșării unei instabilități de curgere a topiturii. Pierderea calității se poate manifesta printr-o gamă largă de defecte, de la simpla alterare a aspectului suprafeței produsului (calandraj, extrudare, injecție) până la extinderea perturbării curgerii în volumul materialului (neomogenitatea produsului sau chiar ruperea extrudatului sau a produsului calandrării).

Deoarece manifestările reologice ale topiturii depind de o multitudine de factori ce țin de reglajul parametrilor de procesare, preocupările pentru îmbunătățirea în ansamblu a procesului de producție trebuie să se fundamenteze pe cunoașterea modificărilor de comportament reologic și identificarea unor modalități cât mai simple, aplicabile industrial, de control a acestuia, de prevenire a instalării unui regim turbulent de curgere.

Nu se exclude, în viitor, continuarea dezvoltării intensive (bazată pe mecanizare, automatizare și cibernetizare în scopul reducerii normei de timp, sporiri calității produselor sau diversificării ofertei de producție) și a dezvoltării extensive, bazate pe elaborarea de noi procedee de prelucrare și tehnologii asociate.

În acest context, tema prezentei teze: "*Studiul activării ultrasonice a proceselor de injectare și extrudare a materialelor termoplastice*" se înscrie în tendința manifestată în ultimul deceniu de reducere a costurilor de producție ca urmare a aplicării principiului: "a produce mai mult la aceeași calitate" și reprezintă o continuare a preocupărilor membrilor colectivului de cadre didactice din cadrul *Laboratorului de Presare la Rece* al catedrei de Tehnologia Construcțiilor de Mașini de la Universitatea POLITEHNICA din Timișoara în domeniul procesării

materialelor polimerice, în mod concret, a cercetărilor derulate în baza contractelor:

- *CNCSU nr. 4004/1995 - tema 26B și nr. 5004/1996 - tema 374: Studiul activării cu ultrasunete a materialelor polimerice în procesele de transformare și*
- *CNCSU nr. 317/1998 - tema 26: Influența activării ultrasonice asupra unor proprietăți reologice în procesele de curgere a materialelor vâsco-elastice.*

Prin tematica sa și programul de cercetare abordat în cadrul tezei de doctorat s-a urmărit definirea exactă a avantajelor tehnice ale activării cu ultrasunete a materialelor polimerice în faze de procesare în raport cu avantajele economice, care ar putea determina ameliorări semnificative ale performanțelor matritelor de injectat cu canale calde și ale filierele mașinilor de extrudare.

În primul caz sunt vizate aspecte de ordin economic (energetic) și al fiabilității pe care le ridică sistemele pe bază de rezistențe electrice, iar în al doilea caz sunt vizate cu precădere aspecte de ordin calitativ specifice proceselor și produselor extrudării. Sunt de așteptat și o serie de efecte conexe cum sunt cele legate de problema stabilității termice a materialelor polimerice și de aditivare a lor.

Lucrarea este structurată pe 9 capitole cuprinzând 205 pagini cu 98 figuri și 33 tabele, 5 anexe și 137 referințe bibliografice din care 7 aparțin autorului (6 dintre ele ca prim autor).

În **capitolul 1** se realizează o sinteză bibliografică privind natura și structura materialelor polimerice, modelarea matematică a curgerii topiturilor de polimeri prin secțiuni finite și influența condițiilor de procesare asupra calității produselor. S-a insistat asupra fenomenelor de alunecare la perete și de curgere instabilă, nelaminară, asupra cauzelor declanșării acestora fiind subliniat rolul major al proprietăților interfeței de contact topitura-perete solid asupra productivității procedurii de extrudare și în definirea parametrilor de regim pentru care se face amorsarea curgerii cu debit oscilant.

Diversitatea mecanismelor și teoriilor existente privind instabilitatea curgerii materialelor polimerice topite se datorează tehnicii de măsurare limitate ca posibilități, deci dificultăților întâmpinate în prelevarea de date precise privind valorile vitezei, presiunii, temperaturii și descrierea distribuției acestor variabile în secțiunea de curgere. Nici unul dintre aceste mecanisme sau modele teoretice prezentate nu explică, independent de celelalte, comportarea reologică reală a fluidului pseudoplastic de multe ori concluziile cercetătorilor în domeniul reologiei fiind în totalitate sau parțial contradictorii.

În studiul bibliografic pe care l-am efectuat, am sintetizat modelele matematice și rezultatele experimentale relevante în ceea ce privește orientarea tezei, care au fost confirmate în lucrări de cercetare independente și a căror valabilitate este acceptată de cvasi-majoritatea cercetătorilor.

De asemenea s-a elaborat un model matematic pentru curgerea cu alunecare la perete fiind stabilit un algoritm pentru determinarea vitezei de alunecare la perete.

În **capitolul 2** se prezintă soluții tehnice pentru dispozitivele utilizate în mod curent în procesarea materialelor polimerice prin injectare și extrudare. S-a insistat asupra duzelor de injecție cu canale calde și a filierelor de extrudare în echer. Acestea, prin modificări constructive de mică importanță, ar putea fi adaptate pentru activarea ultrasonică.

**Capitolul 3** tratează posibilitatea aplicării ultrasunetelor la activarea proceselor de transformare a materialelor polimerice fiind prezentate principiile activării ultrasonice, mărimi caracteristice, sistemul pentru activarea cu ultrasunete și efectele posibile în cazul activării ultrasonice a materialelor polimerice plastificate.

În **capitolul 4**, pe baza concluziilor formulate în capitolele anterioare, se propun soluții constructive pentru activarea ultrasonica a dispozitivelor folosite la procesarea prin injectare și extrudare a materialelor polimerice. De asemenea se stabilesc obiectivele tezei a căror formulare a avut drept scop verificarea aplicabilității soluțiilor propuse care constituie obiectul a două cereri de brevet de invenție.

Scopurile cercetării fiind conturate, s-a trecut la definirea soluției constructive pentru standul de experimentare multe din concluziile cercetătorilor citați în cuprinsul capitolului 1 fiind exploatate în acest scop.. În **capitolul 5** se prezintă etapele de proiectare și realizare a standului experimental pentru studiu activării ultrasonice a proceselor de curgere a materialelor vâscoelastice. În aceasta faza de elaborare a tezei s-a ținut seama de modalitățile de investigare accesibile și posibilitățile de procurare a mijloacelor necesare cercetării.

În **capitolul 6** se prezintă rezultatele unor încercări preliminare care au determinat limitarea gamei de materiale supuse studiului și se definește orientarea programului de experimentare. Aplicarea activării ultrasonice în domeniul procesării prin injectare și extrudare a materialelor polimerice fiind inedită, programul de experimentare abordat pentru evidențierea eventualelor efecte pozitive va avea un rol prospectiv cu scopul de a defini direcțiile de aprofundare, în continuare, a cercetării. Se prezintă, de asemenea, experimentul factorial ca instrument de cercetare științifică care va fi utilizat în continuare pentru optimizarea programului de cercetare.

În **capitolul 7** se prezintă în detaliu programul de experimentare, rezultatele cercetării și interpretarea statistică a acestora. Punerea în evidență a proprietăților reologice ale topiturii s-a realizat într-un mod indirect folosindu-se un reometru de extrudare cu activare ultrasonică de

concepție proprie. Potrivit unei practici curente în domeniul reologiei, principiul de bază utilizat a fost asigurarea curgerii în flux laminar printr-un tub capilar, urmărindu-se evoluția variabilelor debit volumic și temperatura materialului în secțiunea de ieșire ca funcții de temperatura topiturii, presiune, geometria duzei de extrudare, starea de activare ultrasonică.

Au fost vizate, cu precădere, efectul activării ultrasonice asupra debitului extrudat, viteza de alunecare la perete, efectul termic al activării ultrasonice, efectul de suprafață în cazul activării ultrasonice, influența interstiului de curgere asupra intensității efectului activării ultrasonice și efectul activării ultrasonice asupra structurii supramoleculare a extrudatului.

Concluziile generale privind activarea ultrasonica proceselor de curgere a topiturilor de polimeri sunt prezentate în capitolul 8. Având certitudinea efectului benefic al activării ultrasonice în cazul activării suprafeței interioare a canalului inelar de curgere, este de așteptat ca o dublă activare, a suprafeței interioare și a celei exterioare, să multiplice efectul pozitiv demonstrat experimental. În baza acestui considerent s-a întocmit documentația pentru brevetarea soluțiilor constructive prezentate în capitolul 4 (cereri de brevet de invenție dosar OSIM C/1305/15.10.1997 *Procedeu și cap de extrudare cu activare ultrasonică* și dosar OSIM C/25/09.01.1997 *Matrită de injecție activată cu ultrasunete*, ANEXA 4).

Consideram că nu este de neglijat extrapolarea și utilizarea rezultatelor experimentale ale prezentei teze pentru formularea unor soluții tehnice de activare ultrasonica în alte domenii fundamentate pe reologia și dinamica fluidelor: acționari hidraulice (sisteme de poziționare de precizie), aeronautica.

Subiectul acestei teze se înscrie în tendința firească de evoluție a tehnologiei în general iar prin concluziile programului de experimentare și soluțiile tehnice oferite îmbogățește orizontul de cunoștere în domeniul reologiei materialelor vâsco-elastice și propun procedeele de punere în forma a materialelor polimerice prin injecție și extrudare ca noi domenii de aplicabilitate a utilizării oscilațiilor de înaltă frecvență.

Elementele continute în lucrare au un caracter interdisciplinar și sunt în egala măsură rodul cercetărilor întreprinse de autor, singur sau în colectiv, de-a lungul anilor în domeniul procesării materialelor termoplaste și tehnologiilor de prelucrare cu ultrasunete, o parte fiind concretizate în lucrări științifice publicate și în contracte de cercetare.



Un rol important în conturarea ideilor, verificarea acestora și finalizarea tezei au avut-o:

- experiența acumulată în proiectarea și realizarea de matrite de injecție și echipamente ultrasonice la întreprinderea AEM Timișoara (actualmente ABB Rometrics S.A.);
- deprinderile practice, privind exploatarea utilajelor de injecție și extrudare și a dispozitivelor conexe, însușite în timpul unui stagiu industrial efectuat cu sprijinul Guvernului Francez în cadrul unui modul MEF la întreprinderea C.J. DIFFUSION, Baillargues, Franța;
- aprofundarea cunoștințelor teoretice privind procesarea materialelor polimerice, aplicații ale activării ultrasonice, ingineria valorii și proprietate industrială ca necesitate pentru asigurarea unui nivel didactic corespunzător pentru derularea în bune condiții a activităților didactice prestate la Universitatea POLITEHNICA din Timișoara în cadrul disciplinelor *Plasturgie*, *Tehnologii neconvenționale* și *Invenție și ingineria valorii* din planul de învățământ al direcției de specializare *Inginerie managerială și tehnologică*;
- stagiile de doctorat efectuate cu sprijinul Ambasadei Franței la București într-un laborator bine echipat, specializat în chimia macrocompusilor: LEMP /MAO de la Universitatea Montpellier 2, Franța și studiile bibliografice pe care am avut ocazia a le realiza în rețeaua informațională interuniversitară din Franța;
- și, în mod hotărâtor, îndrumarea competentă și de înalt nivel științific din partea conducătorilor tezei de doctorat: domnul profesor doctor inginer Tudor Alexandru ICLĂNZAN de la Universitatea POLITEHNICA din Timișoara și domnul profesor doctor inginer Marc Jean Medard ABADIE de la Universitatea Montpellier 2, Franța.

**Proprietățile materialelor polimerice  
și influența lor asupra comportării reologice a topiturii**

**1.1 Natura și structura materialelor polimerice**

Progresele de astăzi în utilizarea industrială a acestor materiale, atât în ceea ce privește diversitatea materialelor utilizate cât și în privința echipamentelor tehnologice, se datorează structurării unor elemente de cunoaștere a sintezei, proprietăților și mai ales a comportamentului vâscoelastic a materialelor polimerice în procesul de punere în formă.

Este cert faptul că la încălzirea polimerilor nu se produce o volatilizare a acestora ci o descompunere termică a substanței macromoleculare (ruperea legăturilor chimice și eventual rearanjarea atomilor) începând cu o anumită valoare a temperaturii. De aceea compușii macromoleculari se pot prezenta doar sub două stări de agregare: solidă sau lichidă, fiind imposibilă trecerea în stare gazoasă menținând structura macromoleculară inițială.

În ceea ce privește comportarea reală a compușilor macromoleculari, aceasta poate fi descrisă într-un mod acceptabil pe baza *modelului solidului hookean* sau a *modelului fluidului newtonian* prin ecuațiile reologice de stare, (Velceanu, [124]):

- legea lui Hooke:  $f = E \cdot s_e$ , pentru corpul elastic ideal; (1.1)

- legea lui Newton:  $f = \eta \cdot \dot{s}_\eta$ , pentru curgerea corpului vâscos ideal. (1.2)

( $f$  = efort,  $s$  = deformare,  $\dot{s}$  = deformația dependentă de timp, indicii "e" și "η" fiind folosiți pentru desemnarea mărimilor caracteristice manifestării de tip elastic respectiv vâscos)

Conceptia asupra stării reologice a materiei amorfe conduce la reprezentarea schematică din tabelul 1.1 (Velceanu, [124]):

Tabelul 1.1

Solid ideal ( $\eta = 0$ )	Corpuri reale ( $E \neq 0, \eta \neq 0$ )						Fluid Ideal ( $E = 0$ )
	Solide (vâscoelastice)			Fluide (elastovâscoase)			
Elastic $E \neq 0$	Stare vitroasă (sticloasă)	Stare înalt elastică (cauciuc)	Stare solidă cu limită de curgere	Stare fluidă cu limită de curgere	Stare lichidă	Stare gazoasă	Vâscos $\eta \neq 0$
	----->		----->		----->		
	tranziție vitroasa		tranziție prin topire		tranziție prin vaporizare		

Vâscoelasticitatea este proprietatea unui corp de a prezenta comportament intermediar între cel specific corpurilor elastice și cel specific fluidelor. În accepțiunea actuală, solidul real, care manifestă plasticitate, este de fapt un solid elastic care prezintă vâscozitate. Efortul unitar limită sau limita de curgere,  $\sigma_c$ , marchează la acest corp trecerea de la comportarea predominant elastică la cea predominant vâscoasă. În mod analog, un fluid real care manifestă plasticitate este un fluid vâscos care posedă elasticitate. El începe să curgă numai în momentul în care acțiunea internă a componentei elastice este depășită de cea a componentei vâscoase.

Dacă un material vâscoelastic este supus unei deformări  $\varepsilon$  constante, forța necesară pentru menținerea deformății se diminuează cu timpul fiind nulă pentru un fluid ideal ( $E=0$ ) și constantă pentru solidul ideal ( $\eta = 0$ ). Pentru situații reale, evoluția funcției  $\sigma(\varepsilon)$  este prezentată în figura 1.1.

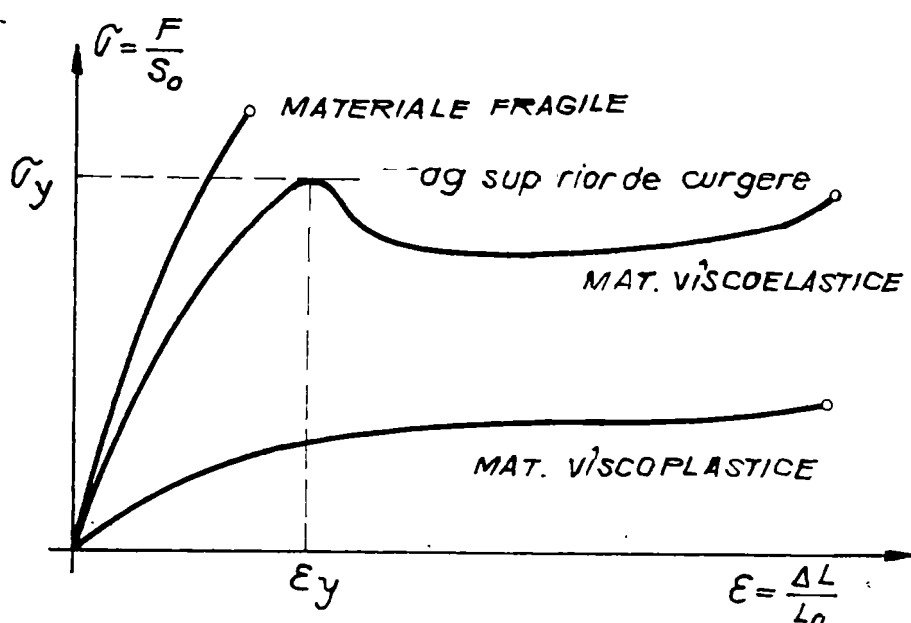


Figura 1.1 Comportarea la efort a diferitelor tipuri de materiale (Velceanu, [124])

Așadar, plasticitatea nu apare ca o a treia stare reologică fundamentală a materiei, ci ca o formă de existență a corpurilor reale, corespunzătoare trecerii acestora de la echilibrul cvasistatic (elastic) la cel dinamic (vâscos).

Pentru înțelegerea comportamentului vâscoelastic a materialelor polimerice este necesar a se defini structura și natura acestor materiale compozite, care sunt constituite dintr-un polimer (sau amestec de polimeri), aditivi, coloranți.

Polimerii ca substanțe macromoleculare de sinteză sunt constituiți pornind de la elementele C, H, O, N, mai rar Cl, S, Si și formează un "aranjament" care se repeta de un mare număr de ori (aranjament monomeric, notat A) astfel încât formula polimerului ar putea să se scrie " $[A]_n$ ".

Particularitatea cea mai importantă a compuşilor macromoleculari o constituie faptul ca în procesele fizico-chimice sau fizico-mecanice intră porţiunea de catenă sau (lanţ macromolecular) şi nu veriga elementară aşa cum este cazul în reacţiile chimice. De aceea, în legătură cu definirea macromoleculilor se fac următoarele remarci :

- Dacă A dispune de doua legături de carbon cu aranjamentele vecine, molecula obţinută este unidimensională, filiformă dar nu liniară ţinând cont de unghiul legăturilor între atomi. Se poate satisface condiţia ca toate legăturile C-C să formeze unghiuri de  $109^{\circ}28'$  în acelaşi plan geometric, dar această situaţie, figura 1.2, este proprie doar sistemelor de macromolecule cu o organizare volumică avansată (semicristaline, cristaline).

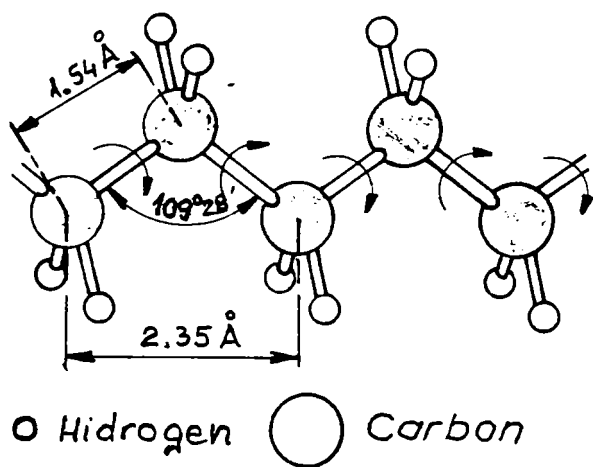


Figura 1.2 Macromolecula unidimensională liniară plană.

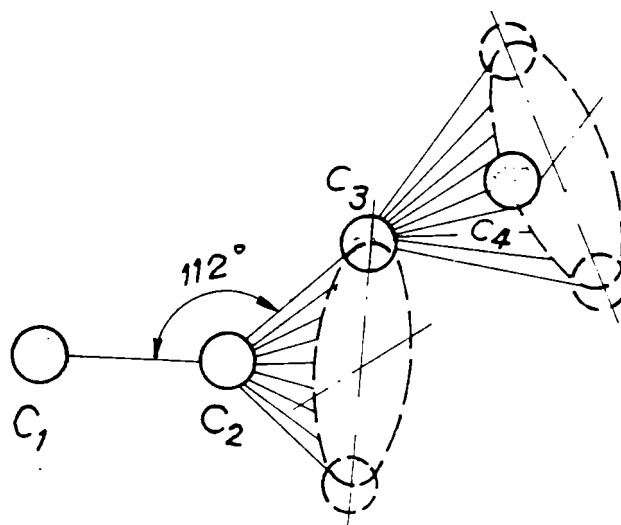


Figura 1.3 rotație în jurul legăturii C-C

În realitate, în anumite condiții de temperatură și solicitare mecanică exterioară, orice atom de C poate pivota în jurul axei definite de legătura C-C (figura 1.3). Pentru un polimer a cărui macromoleculă conține între 1.000 până la 100.000 atomi de carbon numărul configurațiilor posibile este extrem de mare și un lanț de lungime medie a unui astfel de polimer nu va avea, în mod evident, o formă alungită, ci dimpotrivă va adopta o formă spațială aleatoare, pliată, asemănătoare unui ghem denumit "pelotă statistică", aceste structuri spațiale, vecine, fiind întrepătrunse;

- Viteza de transformare conformațională este dependentă de raportul dintre valorile energiei de activare a rotirii,  $\Delta E$  și energia factorilor externi. Cu cât  $\Delta E$  va fi mai mare, cu atât se va micșora flexibilitatea catenei macromoleculare, motiv pentru care  $\Delta E$  este denumită și "flexibilitate cinetică",  $U_0$ .

O catenă poate fi caracterizată ca rigidă dacă bariera de potențial  $\Delta E$  este mare deoarece flexibilitatea cinetică este mică. În acest caz, fără aport exterior de energie pentru depășirea nivelului valoric  $\Delta E$ , segmentele catenei macromoleculare au o mobilitate redusă și vor executa doar răsuciri de o parte și de alta a poziției de minimă energie potențială, (Velceanu, [124]).

Valoarea energiei de activare aparentă poate varia cu temperatura după relația:

$$\Delta E = -2,303 \cdot R \cdot \frac{d(\lg a_T)}{d(1/T)}, \quad (1.3)$$

și prezintă un maxim la o temperatură care corespunde valoric cu  $T_v$ , figura 1.4.

Factorul  $a_T = a(T)$ , denumit "factor de deplasare", indică valoarea translatații izotermei corespunzătoare temperaturii  $T_0$  pentru a obține izoterma la temperatura  $T_i$ .

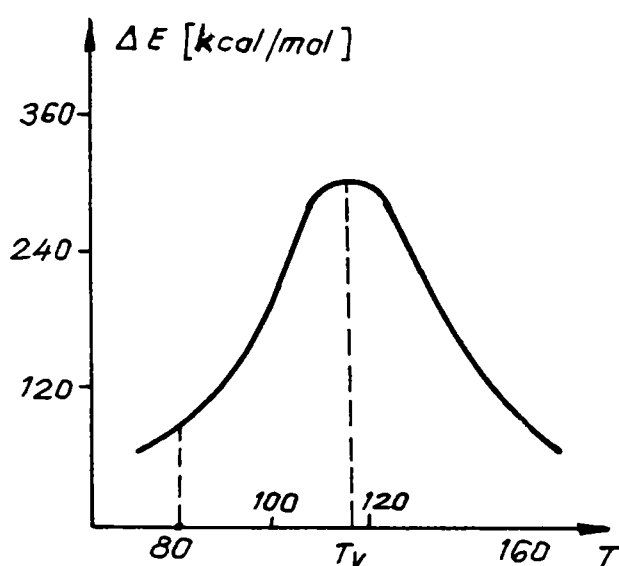


Figura 1.4 Variația energiei de activare cu temperatura pentru PMMA (Velceanu, [124])

Valoarea interacțiunilor intermoleculare, care deasemenea reduc flexibilitatea catenelor, se poate aprecia prin intermediul coeziunii specifice (Mureșan, [92]) dar modul de organizare spațială a aglomerării de macromolecule poate modifica comportamentul polimerului. Astfel polimerii cu energie de coeziune specifică  $4 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3$  J/mol sunt "elastomeri", cei cu  $8 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$  J/mol sunt "materialele plastice" iar cei cu peste  $2 \cdot 10^4$  J/mol sunt considerați "fibre". Excepție face polietilena care, după valoarea energiei de coeziune specifică  $4,2 \cdot 10^4$  J/mol, ar trebui să prezinte proprietăți

specifice elastomerilor dar, datorită capacității de ordonare a structurii prin cristalizare, are proprietăți de material plastic;

- Este posibilă realizarea polimerilor cu structura tridimensională plecând de la un polimer liniar creând, prin reticulare, legături chimice între lanțuri. Procesul de reticulare este acompaniat de o creștere a masei moleculare și, în consecință, a vâscozității până la blocarea oricărei posibilități de mobilizare a macromoleculor.

Pentru polimerii amorfi, cu grad mediu de polimerizare, se disting patru stări fizice caracteristice : două solide (sticloasă sau vitroasă și starea înalt elastică sau superelastice) și două fluide (starea de fluid elastovâscos și starea vâscoasă). Deși delimitarea lor nu este netă, ele pot fi reprezentate schematic conform tabelului 1.2, (Velceanu, [124]).

Compuși macromoleculari cu grad mediu de polimerizare				
Stări solide		Stări fluide		Stare de degradare
Starea vitroasă (sticloasă)	Stare superelastică (înalt elastică)	Stare elastovâscoasă	Stare vâscoasă	Termică
Comportare Elastică $E=10^9 - 10^{10} \text{ N/m}^2$	comportare de cauciuc $E \approx 10^6 \text{ N/m}^2$	fluid vâscos care manifestă și proprietăți elastice (gel) (polimeri înalți cu grad de polimerizare $n > 600\,000$ )	lichid vâscos (topitură)	Substanță depolimerizată
>.....> stare tranzitorie cu comportare vascoelastică				
$T_b$	$T_v$	$T_i$	$T_{cv}$	$T_i$
				$T_d$

Cea mai intrigantă proprietate a polimerilor este elasticitatea de tip cauciuc sau elasticitatea înaltă (deformare elastică reversibilă până la 10%). Această stare este caracteristică la temperatura ordinară numai elastomerilor, celelalte categorii de compuși macromoleculari fiind capabile de a se comporta astfel doar la temperaturi superioare valorii  $T_v$ , temperatură de la care devine posibilă rotația segmentelor de lanț macromolecular, acestea devenind mobile și pot ocupa, în spațiu, alte poziții de energie minimă ca răspuns la o solicitare externă.

Această caracteristică fizică -denumită și temperatură de vitrifiere- definitorie în cazul polimerilor amorfii, este pusă în evidență de reprezentarea variației modului de relaxare cu temperatura, figura 1.5.

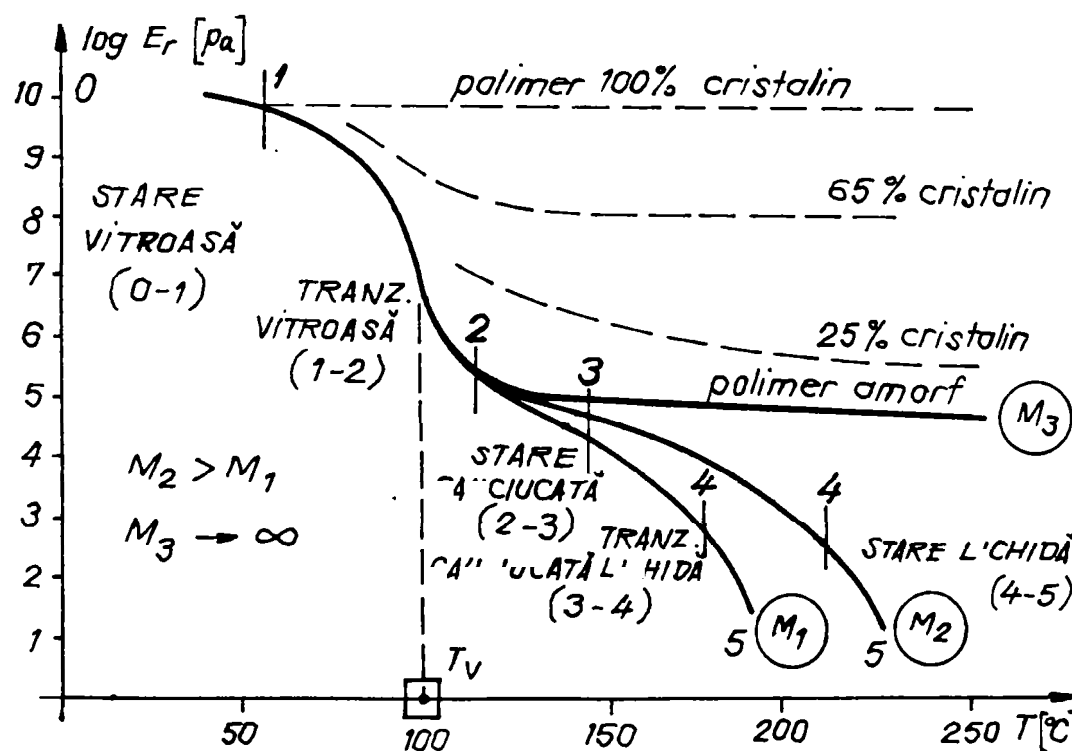


Figura 1.5 Variația modului de relaxare pentru polimeri liniari amorfii funcție de temperatură și masă moleculară

Dependența stărilor fizice ale polimerilor de temperatură ( $T$ ) și de masa lor moleculară ( $M$ ) este redată în figura 1.6 (Velceanu, [124]).

Sub temperatura de vitrifiere,  $T_v$ , atât oligomerii ( $DP < 30$ ) cât și polimerii ( $DP > 30$ ) se găsesc în stare vitroasă (sticloasă). La oligomeri,  $T_v$  delimitează trecerea din stare sticloasă în stare fluid-vâscoasă. Însă, după o anumită masă moleculară (corespunzătoare trecerii de la oligomer la polimer),  $T_v$  marchează trecerea din starea sticloasă în starea superelastice (înalt elastică sau de cauciuc, tranziție caracteristică polimerilor obișnuiți, cu masa moleculară medie  $10^4 - 10^5$ ).

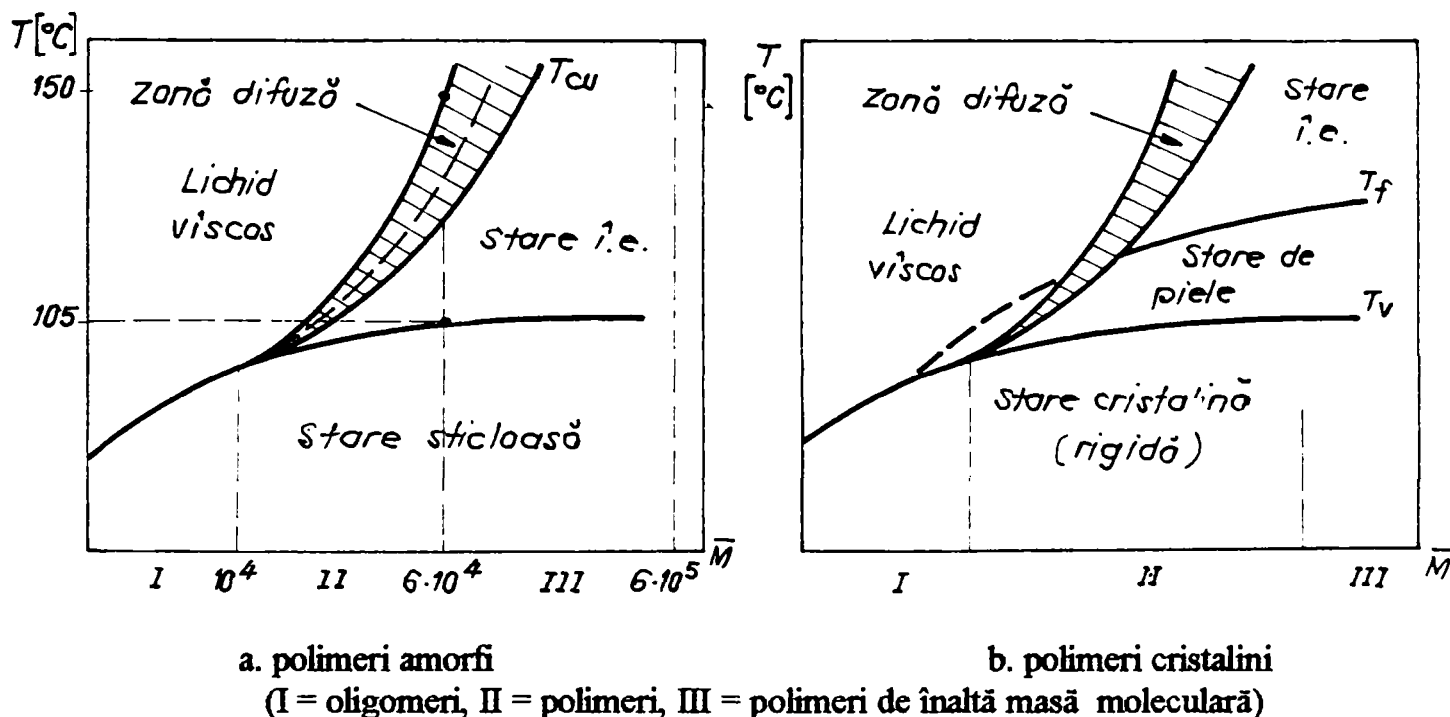


Figura 1.6 Dependența stărilor fizice de temperatură și de masa moleculară

Intervalul de temperatura în care polimerul posedă proprietăți superelastice (stare î.e.) crește odată cu masa moleculară. În mod analog, zona difuză, care separă starea superelastică de cea fluid-vâscoasă, devine tot mai largă cu cât masa moleculară a polimerului este mai mare, dar nu depășește o anumită valoare. Polimerilor de înaltă masă moleculară ( $M > 6 \cdot 10^5$ ) nu le este caracteristică această tranziție deoarece se degradează termic fără a mai trece prin starea fluid-vâscoasă.

Mijlocul zonei de tranziție difuză - numit temperatură de curgere  $T_{cu}$  -, determină limita superioară de utilizare a unui polimer care, în condiții obișnuite de temperatura, se află în stare superelastică (ex: cauciucul) și limita inferioară a unui polimer care în aceleași condiții de temperatură se află în stare de fluid vâscos. Temperatura de curgere,  $T_{cu}$ , deși crește cu mărirea masei moleculare, depinde de o serie de factori cinetici ca : viteza de încălzire, frecvența cu care se efectuează determinarea, viteza de aplicare a forței, etc. Ea mai este afectată de polaritatea

macromoleculor și de polidispersia polimerului (datorită dependenței acesteia de masa moleculară).

În mod asemănător,  $T_v$  marchează limita superioară de utilizare a unui polimer termoplastice (amorf) și limita inferioară de utilizare a unui elastomer (cauciuc) amorf, ANEXA 1.

Polimerii termoplastici ca polistirenul (PS), polimetacrilatul de metil (PMMA), policlorura de vinil (PVC), etc., care la temperatură obișnuită se află în stare sticloasă ( $T < T_v$ ), pot fi prelucrați prin injecție și extrudare numai la temperaturi mai mari decât  $T_{cu}$ .

Polimeri ca poliizoprenul, polibutadiena, policloroprenul, poliizobutena, etc., manifestă la temperatura obișnuită proprietăți superelastice ( $T > T_v$ ) și au, în consecință, la aceste temperaturi, comportări de elastomeri (cauciucuri).

În domeniul cuprins între temperatura de vitrifiere și temperatura de curgere viscoasă ( $T_{cv}$ ), vâscozitatea unui polimer amorf variază cu temperatura după o curbă de forma celei redată în figura 1.7 după o "ecuație W L F", relația (1.60). Această relație furnizează o bază teoretică relației empirice a lui Williams, Landel și Ferry. Ipoteza emisă susține că vâscozitatea depinde de temperatură în măsura în care aceasta modifică fracția volumului liber aparent prezentă în polimerul în cauză.

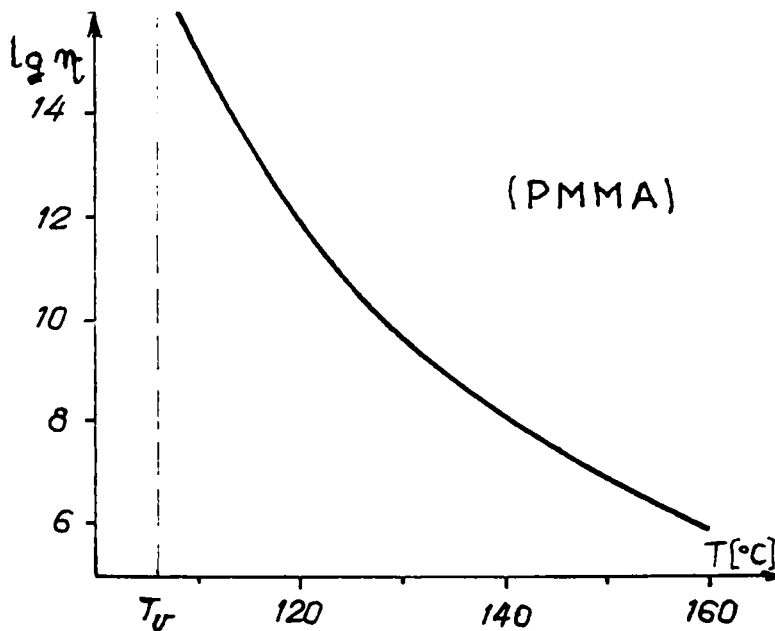


Figura 1.7 Variația vâscozității cu temperatura pentru PMMA

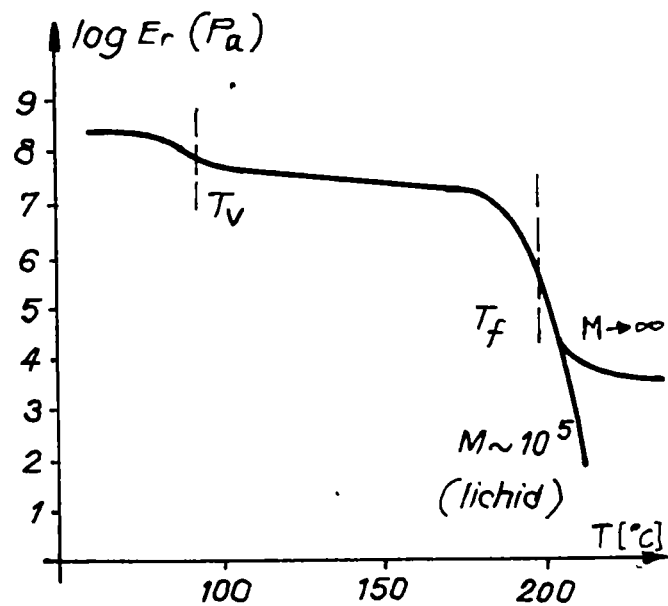


Figura 1.8 Variația modului de relaxare cu temperatura pentru un polimer semicristalin

Pentru un polimer semicristalin, din diagrama care exprimă variația modului de relaxare cu temperatura, figura 1.8, se constată că după o prima scădere a modului datorită trecerii



polimerului vitros ( $T > T_v$ ) în stare plastifiată urmează o diminuare lentă pînă în vecinătatea punctului de topire  $T_f$  dar numai pentru  $T > T_f$  faza cristalină dispăre și întreg volumul polimerului trece la starea topită. La acest tip de polimeri, semicristalini, temperatura de fuziune (topire) este cea de care se ține seama la stabilirea parametrilor de procesare.

Cunoașterea valorilor  $T_v$ ,  $T_f$  și  $T_{cu}$  este foarte importantă pentru stabilirea condițiilor de prelucrare și utilizare a polimerilor. Diferențierea  $T_{cu}$  de  $T_v$  se realizează la o anumită masa moleculară. Cu cât catenele polimerului sunt mai rigide, cu atât scindarea  $T_{cu}$  de  $T_v$  se produce la o masa moleculară mai mare. Astfel, la polimerii cu grad mediu de polimerizare, intervalul de temperatură  $T_v - T_{cu}$  nu depășește de obicei  $20 \div 50^\circ\text{C}$ .

În schimb, la polimerii cu grad mare de polimerizare, el poate atinge  $100^\circ\text{C}$  sau chiar mai mult iar polimerii cu mase moleculare foarte mari se descompun termic fără a mai trece prin starea fluid vâscoasă, (Velceanu, [124]).

Un exemplu edificator în acest sens îl oferă polimetacrilatul de metil (PMMA) care pentru masa moleculară medie ( $M = 6.000$ ) trece în stare superelastice la  $105^\circ\text{C}$  iar în cea fluid vâscoasă la  $150^\circ\text{C}$ . Având interval de curgere (zona difuză de tranziție), poate fi prelucrat prin injectare sau extrudare. În schimb, polimerul înalt de PMMA ( $M = 600.000$ ), deși are aceeași temperatură de tranziție vitrosă ( $T = 105^\circ\text{C}$ ), la creșterea temperaturii se descompune fără a mai trece prin starea fluid-vascoasă, nu are deci interval de curgere și nu este injectabil, figura 1.6a.

În intervalul de curgere  $T_v - T_{cu}$ , polimerul, întrucât combină proprietățile stării înalt elastice și fluid vâscoase, este elastovâscos și disipează sub formă de căldură o parte considerabilă din energia primită în procesul prelucrării.

Trecerea polimerului topit (elastovâscos), supus unei presiuni înalte - de injectare, prin zone înguste ale canalului de injectare poate determina, printr-un mecanism de frecare internă, creșterea temperaturii, figura 1.9.

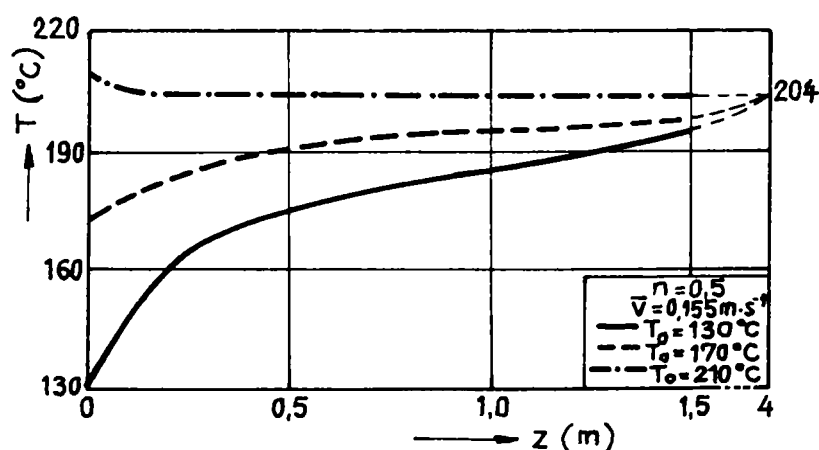


Figura 1.9 Variația temperaturii topiturii funcție de lungimea traseului parcurs, (Mihail, [89])

În cazul în care aceasta depășește temperatura de descompunere termică, efectul creșterii temperaturii este modificarea naturii polimerului deci și a proprietăților materialului prin degradarea lanțului macromolecular.

## 1.2 Structura supramoleculara a polimerilor

Chiar atunci când starea lor este amorfă, dispunerea spațială a macromoleculelor de polimeri nu este întâmplătoare. Acestea manifestă tendința de dispunere în mănunchiuri sau "pachete macromoleculare" sau "clusters" de dimensiuni relativ mici în care se manifestă tendința de dispunere într-o anumită direcție. Aceste formațiuni, în care nu există o generalizare a paralelismului între porțiunile de catene continute, se pot plia și nu afectează mobilitatea termică a segmentelor catenare, (Ubbelohde, [121]).

Acest mod de organizare supramoleculară nu se extinde la întreg volumul materialului fiind prezente, zonal, domenii cu secvențe catenare neorientate. Prin urmare, se poate concepe modalitatea de organizare a substanței macromoleculare amorphe: sub forma de "mănunchiuri sau "pachete necristaline" și sub "forma de matrici" cu structură necompactă (afănată), (Velceanu, [124]).

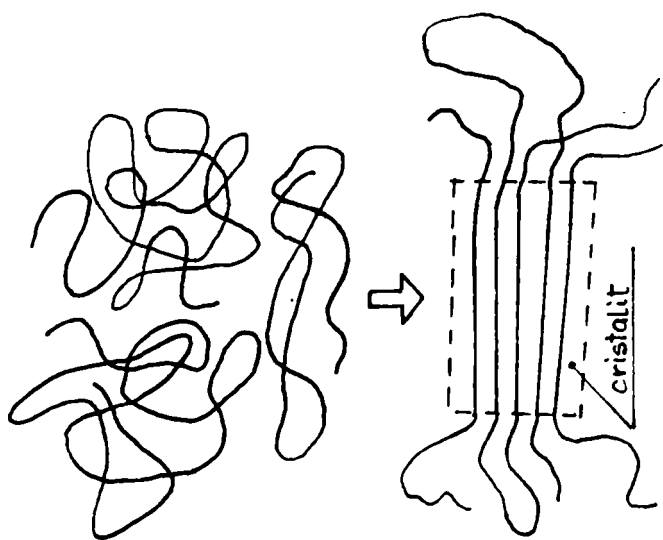


Figura 1.10 Formarea pachetelor cristaline

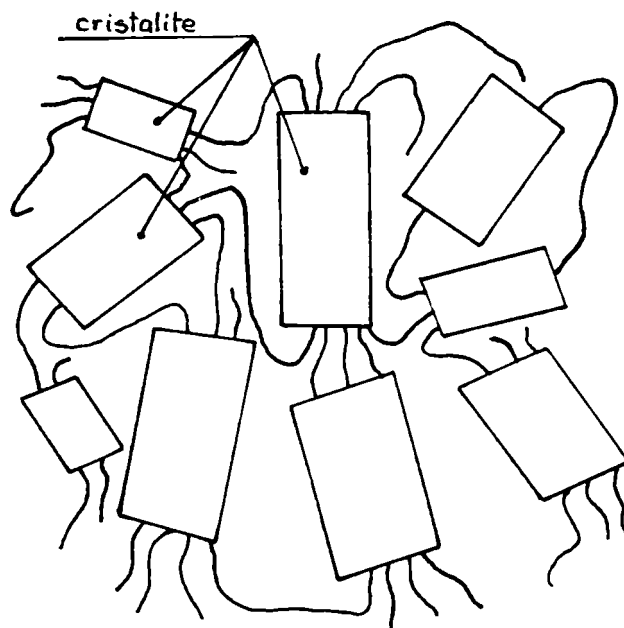


Figura 1.11 Natura bifazică a polimerilor înalți

Deoarece dimensiunile mănunchiurilor necristaline sunt mici, comparativ cu lungimile macromoleculelor, se admite că aceleași lanțuri macromoleculare pot străbate mai multe domenii de acest fel, fiind acceptată ideea că părți ale lanțurilor macromoleculare pot să se dispună, în condiții

625.353/181A

determinate, paralel unele cu altele, formînd "mănușuri ordonate" sau "pachete cristaline" denumite și cristalite, figura 1.10.

Se identifică astfel noțiunile de ordonare macromoleculară, cristalizare incipientă, iar cristalizarea propriu-zisă care presupune dispunerea spațială regulată a cristalitelor reprezintă o modalitate de ordonare, zonală, avansată a macromoleculilor, specifică polimerilor cu un înalt grad de cristalinitate. Schematizarea din figura 1.11 sugerează natura bifazică a polimerilor înalți ca rezultat al faptului că fiecare macromoleculă poate participa la formarea mai multor zone cristaline care sunt astfel despărțite de zone amorfă, compuse din secvențe catenare fără o orientare precisă motiv pentru care un polimer nu cristalizează 100 %.

Polimerii cu lanțuri foarte lungi, în care probabilitatea de participarea macromoleculei la mai mult de un singur cristal este ridicată, vor avea un grad de cristalinitate mai redus decît polimerii cu lanțuri scurte la care este mai ușor a se constitui condițiile favorizante pentru o organizare supramoleculară zonală.

Teorii recente, (Simionescu, [110]), extind conceptul de ordonare a lanțurilor polimerice considerînd că organizarea supramoleculară apare încă din stare amorfă sub forma unor "globule individuale" formate de catena filiformă a cărei segmente statistice au o dispunere reciprocă dezordonată în interiorul sferei astfel formate. Organizarea structurală în stare amorfă sub formă de globule se întâlnește la polimerii fenolformaldehidici, poliepoxicici dar și la PVC rigid.

Ca atare, la temperaturi sub  $T_v$ , pachetele de secvențe catenare (liniare) și mici pachete globulare reprezintă două tipuri de structuri supramoleculare primare. Peste  $T_v$ , datorită creșterii mobilității macromoleculilor, are loc un proces de asociere a acestor formațiuni supramoleculare, fără transformări de fază, rezultatul fiind formarea structurii globulare polimoleculare, sau a structurii liniare – tipice cauciucului, (Simionescu [110], Velceanu [124]).

Procesele de ordonare a formațiunilor supramoleculare primare – cristalite - în structuri cu o organizare spațială caracteristică se poate face prin: etirare, răcire (cauciuc natural, PVC, etc), încălzire (polimeri termoreactivi), iradiere și sinteză.

Un caz interesant de conformație reticulară uniformă, necristalină, îl reprezintă polimerii cu structură globulară dacă între atomii din diferite globule intervin legături chimice. Structura astfel rezultată este o rețea tridimensională cu nodurile ocupate de globurile macromoleculare.

În cazul polimerilor care manifestă proprietăți înalt elastice foarte clar conturate, prin răcire în condiții care exclud posibilitatea cristalizării, catenele lanțului macromolecular se pot fixa în poziții aleatoare, au o oarecare mobilitate a elementelor lor de structura dar generează o structură afănată care crează dificultăți în regrupările și deplasările ulterioare ale macromoleculilor.

## 1.3 Modelarea matematică a curgerii topiturilor de polimer prin secțiuni finite

### 1.3.1 Considerații generale

Descrierea comportării unui polimer în timpul curgerii presupune soluționarea unui sistem de ecuații ce reprezintă:

- ecuația de continuitate;
- ecuația de conservare a momentului liniar;
- ecuația de conservare a energiei;
- ecuația constitutivă;
- ecuații de corelare a proprietăților fizice ale polimerilor cu diverse mărimi termodinamice de stare.

Relațiile stabilite pentru fiecare caz în parte sunt folosite pentru modelarea și înțelegerea comportării reologice a fluidelor, în activitatea de proiectare și operare tehnologică în domeniul procesării polimerilor.

Forma generală a ecuației de conservare a momentului liniar este ,

$$\rho D\bar{v}/Dt = -[\nabla \bar{\tau}] - [\nabla p] + \rho \cdot \bar{g} \quad \text{cu} \quad \rho D\bar{v}/Dt = \partial[\rho\bar{v}]/\partial t + [\bar{v} \cdot \{\nabla \rho\bar{v}\}], \quad (1.4)$$

$$\text{sau sub forma } -\nabla p + \eta \nabla^2 v + \rho F = \rho dv/dt, \quad (1.4')$$

relații în care:  $\rho$  = densitatea materialului;  $v$  = viteza de curgere;  
 $F$  = forța aplicată;  $p$  = presiunea hidrostatică..

Cunoscută sub numele de ecuația Navier-Stokes, această ecuație reprezintă un echilibru dinamic de forțe dat de legea a doua a lui Newton, (Huynh, [63]). Semnificația termenilor ecuației este următoarea: termenul din membrul stâng reprezintă acumularea de forțe raportate la unitatea de volum, primul termen din membrul drept reprezintă forțele vâscoase raportate la unitatea de volum, al doilea termen din membrul drept reprezintă forțele de presiune raportate la unitatea de volum și ultimul termen din membrul drept reprezintă forțele gravitaționale raportate la unitatea de volum.

Pentru fluide incompresibile, cazul ideal, formele analitice ale ecuațiilor de conservare a masei și momentului sunt (Mihail, [89]):

$$\sum_{j=1}^3 \partial v_j / \partial x_j = 0, \quad (1.5)$$

$$\rho(\partial v_i / \partial t + \sum_{j=1}^3 v_j \cdot \partial v_i / \partial x_j) = -\partial p / \partial x_i - \sum_{j=1}^3 \partial \tau_{ij} / \partial x_j + \rho \cdot g_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1.6)$$

Se constată ca sistemul acestor 4 ecuații conține 13 (6 + 6 + 1) mărimi necunoscute:  $\bar{v}$ ,  $\bar{\tau}$ ,

p. Pentru multe materiale, tensorul tensiunii vâscoase  $\bar{\tau}$  este simetric, numărul necunoscutelor reducându-se astfel la 10 (6 + 3 + 1) pentru patru ecuații. Se impune deci formularea a 6 ecuații suplimentare, ecuațiile constitutive, de forma:

$$f(\bar{v}, \bar{\tau}, \bar{\Delta}) = 0, \quad \text{unde } \bar{\Delta} \text{ este tensorul vitezelor de deformare,} \quad (1.7)$$

Acestea trebuie exprimate sub forma tensorială pentru a le asigura independența față de sistemul de coordonate și exprimă răspunsul fluidului la aplicarea unui stimul exterior. De regulă forțele interatomice și intermoleculare sunt implicate în definirea naturii și mărimii acestui răspuns.

Ecuatiile constitutive sunt deci funcții

$$\bar{\tau} = \alpha_0 \bar{\delta}, \quad , \text{ pentru fluide de ordin zero;} \quad (1.8)$$

$$\bar{\tau} = \alpha_0 \bar{\delta} + 2\alpha_1 \bar{\Delta}, \quad , \text{ pentru fluide de ordinul întâi, newtoniene;} \quad (1.9)$$

$$\bar{\tau} = \alpha_0 \bar{\delta} + 2\alpha_1 \bar{\Delta} + 4\alpha_2 \bar{\Delta}^2 + \alpha_3 \dot{\bar{\Delta}}, \text{ pentru fluide de ordinul doi, ne-newtoniene.} \quad (1.10)$$

$$\text{în care } \bar{\delta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \text{este tensorul unitate,} \quad (1.11)$$

$$\dot{\bar{\Delta}} = \mathcal{D}\bar{\Delta}/\mathcal{D}t = \partial\bar{\Delta}/\partial t + \{\bar{v} \cdot \nabla \bar{\Delta}\} + (1/2)\left(\{\bar{\omega} \cdot \bar{\Delta}\} - \{\bar{\Delta} \cdot \bar{\omega}\}\right), \quad (\text{derivata Jaumann}) \quad (1.12)$$

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \Delta, \quad \text{este tensorul vârtej sau turbion} \quad (1.13)$$

$$\text{iar } \bar{\Delta} = \left\{ \nabla \cdot \bar{v} \right\} + \left\{ \nabla \cdot \bar{v} \right\}^T = \begin{bmatrix} \partial_x / \partial x & \partial_x / \partial y & \partial_x / \partial z \\ \partial_y / \partial x & \partial_y / \partial y & \partial_y / \partial z \\ \partial_z / \partial x & \partial_z / \partial y & \partial_z / \partial z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial_x / \partial x & \partial_y / \partial x & \partial_z / \partial x \\ \partial_x / \partial y & \partial_y / \partial y & \partial_z / \partial y \\ \partial_x / \partial z & \partial_y / \partial z & \partial_z / \partial z \end{bmatrix}$$

este tensorul vitezei de deformare. (1.14)

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  nu sunt constante ci funcții scalare de forma polinomială ale celor trei invarianți principali ai tensorului vitezei de deformare, (Mihail, [89]).

In aceste ecuații constitutive trebuie explicitată forma funcțiilor de material. Potrivit teoriei mecanicii mediilor continue, pentru curgeri reometrice se cunosc trei funcții de material:

$$F_1(\dot{\gamma}) = \tau_{12} = \tau_{21} = \alpha_1 \cdot \dot{\gamma}_{12} = \eta_a(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}_{12}, \quad (1.15 \div 1.17)$$

$$F_2(\dot{\gamma}) = \tau_{11} - \tau_{22} = -\alpha_3 \cdot \dot{\gamma}_{12}^2 = \psi_1(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}_{12}^2, \quad - \text{prima diferențială a tensiunilor normale};$$

$$F_3(\dot{\gamma}) = \tau_{22} - \tau_{33} = (\alpha_2 - \alpha_3/2) \cdot \dot{\gamma}_{12}^2 = -\psi_2(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}_{12}^2, \quad - \text{a doua difer. a tensiunilor normale};$$

relații în care  $\dot{\gamma} = \text{gradientul vitezei de forfecare}$ .

Funcțiile de material  $\eta_a$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  sunt funcții de viteza de deformare prin forfecare, respectiv  $\eta_a(\dot{\gamma})$ ,  $\psi_1(\dot{\gamma})$ ,  $\psi_2(\dot{\gamma})$  și se numesc:

$\eta_a$  - funcția de vâscozitate aparentă;

$\psi_1$  - coeficientul primei diferențiale a tensiunilor normale;

$\psi_2$  - coeficientul celei de-a doua diferențiale a tensiunilor normale.

Pentru  $\alpha_3 = 0$  se obține ecuația constitutivă a fluidului Reiner-Rivlin neliniar

$$\bar{\tau} = \alpha_0 \bar{\delta} + 2\alpha_1 \bar{\Delta} + 4\alpha_2 \bar{\Delta}^2, \quad (1.18)$$

Deplasări ale fluidelor în care  $\bar{\Delta} = 0$ , definesc fluide ideale (de ordin zero) iar fluidele a căror comportare reologică este descrisă de o ecuație:  $\bar{\tau} = a \cdot \bar{\Delta}$  (1.19)

în care raportul între semnalul aplicat și răspuns este constant,  $a = \mu$ , definesc o clasa importantă de fluide denumite fluide newtoniene (fluide de ordinul întâi), incompresibile, pentru care  $\alpha_0 = 0$ ,  $\mu = \text{constant} = \text{tensiune de forfecare} / \text{viteza de deformare prin forfecare}$ .

Dacă  $a = f(\bar{\Delta}, \dots)$ , fluidul este neneutronian și raportul semnal / răspuns nu mai este constant (fluide de ordinul doi). Este cazul particular al soluțiilor și topiturilor de polimeri pentru care ecuațiile constitutive sunt neliniare:

$$\bar{\tau} = -\eta^* \bar{\Delta}, \quad (1.20)$$

Dacă numai componentele de forfecare ale lui  $\bar{\Delta}$  sunt nenule (curgerea de forfecare simplă) atunci singurele componente nenule ale lui  $\bar{\tau}$  sunt, de asemenea, cele de forfecare deoarece  $\eta$  este definită drept o cantitate scalară.

In curgerile simple se definește vâscozitatea aparentă data de relația :

$$\eta_a = \tau_{12} / \dot{\Delta}_{12} = \tau_{12} / \dot{\gamma}_{12} = \text{tensiunea totală de forfecare} / \text{viteza totală de deformare}, \quad (1.21)$$

### 1.3.2 Comportamentul newtonian al fluidelor

În curgerea laminară, sau de forfecare simplă, tensorul vitezei de deformare  $\bar{\Delta}$  nu are decât două componente nenule,  $\bar{\Delta}_{12}$  și  $\bar{\Delta}_{21}$ , în poziții simetrice și deci egale, (Huynh [63]):

$$\bar{\Delta}_{12} = \bar{\Delta}_{21} = \frac{1}{2} \dot{\gamma} \quad \text{și} \quad \bar{\Delta}_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & \dot{\Delta}_{12} & 0 \\ \dot{\Delta}_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (1.22)$$

Tensorul solicitării are, deasemenea, doar două componente nenule, simetrice și egale:

$$\tau = \sigma_{12} = \sigma_{21} = 2 \eta_0 \cdot \bar{\Delta}_{12}, \quad (1.23)$$

Comportamentul newtonian al unui fluid este deci caracterizat de o astfel de relație liniară, figura 1.12, între efortul de forfecare  $\tau$  și gradientul de viteză de forfecare  $\dot{\gamma}$ , relație în care  $\eta$  este un coeficient de proporționalitate, numit vâscozitate, iar  $\eta_0$  este notația folosită pentru a desemna vâscozitatea newtoniană și definește o mărime scalară, independentă de efortul de forfecare și de timpul de solicitare. Factorii ce influențează vâscozitatea sunt: temperatura, structura polimerului și, în anumite condiții, presiunea.

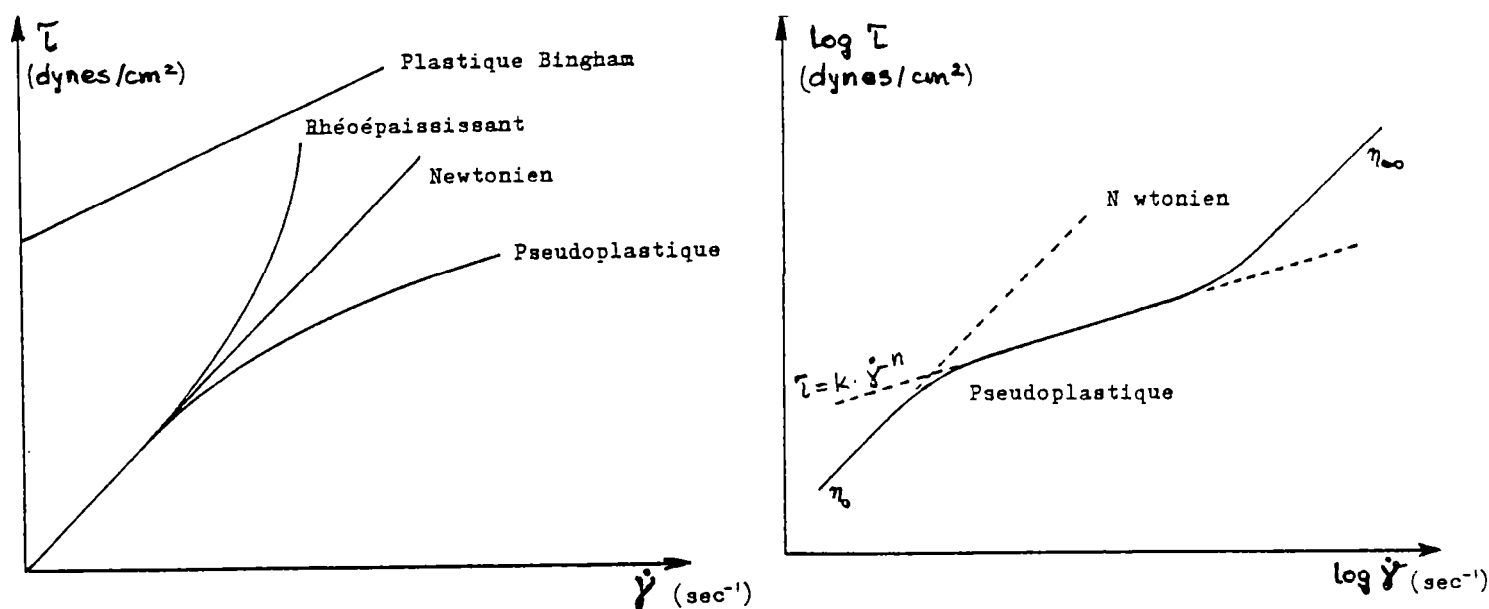


Figura 1.12 Principalele comportări ale topiturilor de polimer. Curbe de curgere (Huynh [63])

### 1.3.3 Fluide ne-newtoniene. Modelul Oswald de Waele

Ținând seama că pentru eforturi de forfecare importante, vâscozitatea aparentă  $\eta_a$  a polimerilor plastificați nu este independentă de gradientul vitezei de forfecare, pentru definirea comportării neliniare a acestor fluidelor, ne-newtoniene, au fost propuse mai multe forme neliniare ale ecuațiilor constitutive.

Aceasta clasă de fluide se subdivide în trei categorii:

1. Fluide vâsco-inelastice, denumite și fluide Stokes, care sunt izotrope și omogene. Pentru acestea, solicitarea de forfecare nu depinde decât de gradientul vitezei de forfecare, figura 1.12a:

a). Fluidele plastice Bingham, capabile să suporte o anumită solicitare minimală  $\tau_0$  înainte de a se produce curgerea. Reprezentarea grafică a variației efortului de forfecare funcție de gradientul vitezei de forfecare nu trece prin originea axelor;

b). Fluidele pseudo-plastice descrise de legea Oswald de Waele în cazul cărora vâscozitatea aparentă scade cu creșterea gradientului vitezei de forfecare prin diminuarea progresivă a interacțiunilor moleculare odată cu creșterea gradientului de viteză de forfecare;

c). Fluidele Reiner-Rivlin pentru care tensorul solicitării poate fi exprimat printr-o serie de termeni ai tensorului vitezei de deformare. În cazul fluidelor newtoniene

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0, \text{ iar pentru fluide Reiner-Rivlin } \sigma_{11} = \sigma_{22} \neq 0 \text{ și } \sigma_{33} = 0.$$

2. Fluide vâsco-elastice care prin curgere disipează energie prin frecare internă și pentru care deformarea nu poate fi neglijată, după încetarea solicitării acestea revenind la starea inițială.

3. Fluide reopectice și tixotrope a căror comportare este dependentă de timp datorită schimbării continue a structurii materialului.

Dintre modelele reologice cele mai utilizate pentru modelarea matematică a fenomenelor de curgere se disting cele ce caracterizează fluidele pseudoplastice și dilatante (Oswald de Waele), fluidul Bingham și fluidele vascoelastice.

O expresie generală a ecuației constitutive ce include aceste modele reologice este data de relația:

$$\bar{\tau} = \alpha_0 \bar{\delta} + \alpha_1 \bar{\Delta} + \alpha_n \bar{\Delta}^n, \quad (1.24)$$

valorile coeficienților  $\alpha_i$  fiind prezentați în tabelul 1.3



Tabel 1.3

Ecuatia reologica	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_n$
Newton	0	$\mu$	0
Oswald de Waele	0	0	m
Bingham	$\tau_0$	$\eta_0$	0

Pentru modelul Oswald de Waele, mai des utilizat, vâscozitatea aparentă este dată de relația

$$\eta_a = m \cdot \left( \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\Delta} : \bar{\Delta})} \right)^{n-1}, \quad (1.25)$$

în care  $m$  este indicele de consistență cu dimensiunea  $[N \cdot s^n \cdot m^{-2}]$  și  $n$  este indicele de curgere (exponentul legii puterii) adimensional.

Variația vâscozității aparente în raport cu viteza de deformare prin forfecare presupune o valoare infinită a  $\eta_a$  pentru fluidele pseudoplastice ( $n < 1$ ) când viteza de deformare tinde spre

zero și o valoare infinită pentru fluidele dilatante ( $n > 1$ ), când viteza de deformare tinde spre infinit, figura 1.13a, ceea ce nu corespunde întocmai rezultatelor experimentale. Deci ecuația (1.25) nu descrie extremitățile curbei, vâscozitățile respective rezultând prin extrapolare, figura 1.13b (Mihail, [89]).

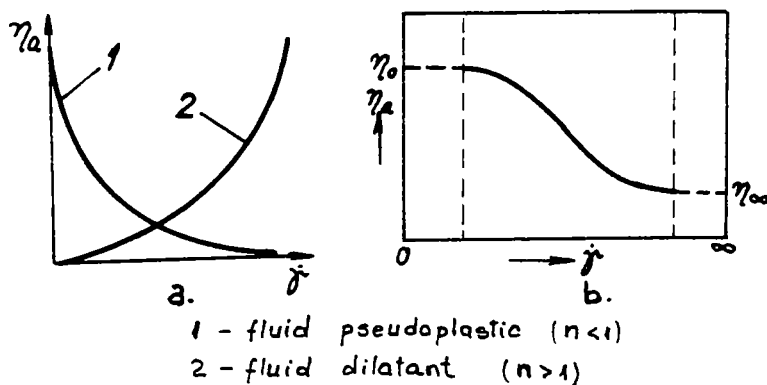


Figura 1.13 Variația vâscozității aparente funcție de viteza de deformare prin forfecare

Modelul Oswald de Waele este utilizat, chiar prezentând aceste deficiențe, pentru că are o formă algebrică simplă și nu conține decât două constante ajustabile. Experimental se pot determina

$\eta_0$  - vâscozitatea la tensiune de forfecare nulă;

$\eta_\infty$  - vâscozitatea la tensiune de forfecare infinită;

$\tau_{1/2}$  - tensiunea de forfecare la  $\eta_a = \eta_0 / 2$ .

Pentru materiale polimerice topite, ecuația constitutivă corespunzătoare curgerii simple în sistem de coordonate cilindrice, figura 1.14, și curgere unidirecțională are expresia:

$$\tau_{rz} = m (-dv_z/dr)^n, \quad (1.26)$$

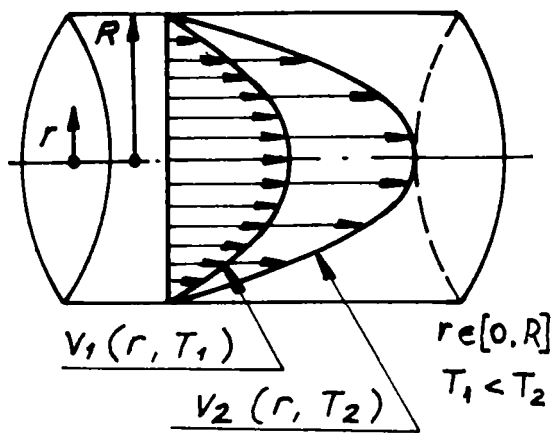


Figura 1.14 Geometria canalului de curgere cilindric cu secțiune liberă

În baza ipotezelor simplificatoare acceptate în literatura de specialitate pentru curgerea laminară, unidirecțională a topiturii polimerice, într-un tub capilar (curgere Poisseuille) cu raport  $L/D$  de valoare ridicată:

- curgerea este permanentă, laminară și izotermă;
- viteza de curgere nu are decât o componentă axială ( $v_z \neq 0, v_x = v_y = 0$ );
- nu se produce "alunecarea la perete" a masei topite tranzitate prin tub;

- topitura este incompresibilă și nu suferă modificări de structură astfel încât tensiunea de forfecare (contrainte de cisailment) este unicul parametru ce influențează gradientul de viteză de deformare prin forfecare (viteze de cisailment);
- influența forței gravitaționale se neglijează.

Ecuția generală de conservare a momentului liniar (Navier- Stokes) se reduce astfel la forma:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(r\tau_{rz}), \quad (1.27)$$

Membrul stâng al ecuației (1.27) este o funcție numai de  $z$ , iar cel drept o funcție numai de  $r$ . În consecință, ambii membri trebuind să egaleze o constantă  $k_0$ , profilul de presiune este liniar în raport cu coordonata în care are loc curgerea:

$$p = k_0 \cdot z + k_1, \quad (1.28)$$

Constantele  $k_0$  și  $k_1$  se determină folosind condițiile la limită:

$$\begin{aligned} z = 0, & \quad p = p_0 \\ z = L, & \quad p = p_L \end{aligned} \quad (1.29)$$

și rezultă:

$$p = -(p_0 - p_L) \left(\frac{z}{L}\right) + p_0 = -\Delta p \left(\frac{z}{L}\right) + p_0, \quad (1.30)$$

în care  $\Delta p = p_0 - p_L$  reprezintă căderea de presiune în lungul canalului. (1.31)

Răsturnând ecuația (1.27) scrisă sub forma:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(r\tau_{rz}), \quad (1.32)$$

separând variabilele și integrând se obține

$$\tau_{rz}(r) = \frac{1}{2} \Delta p \left(\frac{r}{L}\right) + C_1/r, \quad (1.33)$$

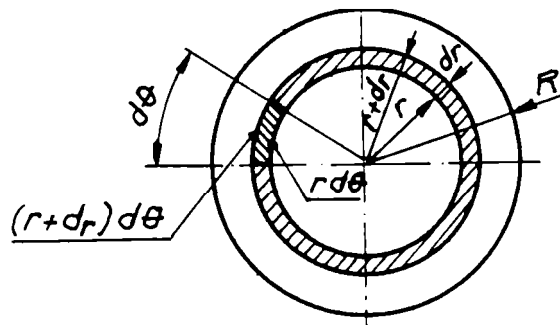


Figura 1.15 Secțiunea diferențială de curgere (Mihail [89])

Constanta de integrare  $C_1 = 0$  deoarece, fizic,  $\tau_{rz}$  nu poate deveni infinit în axa canalului, ecuația de distribuție a tensiunii de forfecare având expresia:

$$\tau_{rz}(r) = \tau_R (r/R) \quad (1.34)$$

în care  $\tau_R = \Delta p R / (2L)$  reprezintă tensiunea de forfecare la peretele canalului. (1.35)

Relația (1.34) este independentă de modelul reologic al fluidului considerat. Din ecuațiile (1.26) și (1.34), exprimând amândouă tensiunea de forfecare, rezultă:

$$m (-dv_z/dr)^n = \tau_R (r/R), \quad (1.36)$$

din care se obține gradientul radial al vitezei axiale de curgere:

$$-dv_z/dr = (\tau_R/m)^\varepsilon (r/R)^\varepsilon \quad (1.37)$$

unde  $\varepsilon = 1/n$  este inversul indicelui de curgere. (1.38)

Integrând ecuația (1.37) de la o raza curentă  $r$  până la peretele canalului,  $r = R$ , la care  $v_z = 0$  (din condiția de aderență la perete):

$$-\int_{v_z}^0 dv_z = \left(\frac{\tau_R}{m}\right)^\varepsilon \cdot \int_r^R \left(\frac{r}{R}\right)^\varepsilon dr, \quad (1.39)$$

se obține profilul radial al vitezei axiale de curgere

$$v_z(r) = (\tau_R/m)^\varepsilon [R/(\varepsilon + 1)] [1 - (r/R)^{\varepsilon+1}] \quad (1.40)$$

În axa canalului,  $r = 0$ , viteza este maximă:

$$v_0 = (\tau_R/m)^\varepsilon R / (\varepsilon + 1) \quad (1.41)$$

ceea ce permite rescrierea expresiei (1.39) în forma:

$$v_z(r) = v_0 [1 - (r/R)^{\varepsilon+1}], \quad (1.42)$$

Pentru calcule de dimensionare este preferabil ca în locul lui  $\tau_R$  să apară mărimea direct măsurabilă  $\Delta p$ ; din ecuația (1.33) rezultă  $\tau_R = \Delta p R / (2L)$  cu care (1.40) devine:

$$v_z(z) = \frac{R^{\varepsilon+1}}{\varepsilon + 1} \cdot \left(\frac{1}{2m} \cdot \frac{\Delta p}{L}\right)^\varepsilon \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\varepsilon+1}\right], \quad (1.43)$$

Se observă că pentru  $\varepsilon = 1$  se obține profilul de viteze parabolic al fluidului newtonian, în curgere laminară :

$$v_z(r) = \frac{R^2}{4\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right], \quad (1.44)$$

în care  $m$  a fost înlocuit cu vâscozitatea fluidului newtonian  $\mu$ .

Expresia debitului volumic care trece prin secțiunea diferențială  $r \cdot dr \cdot d\theta$ , figura 1.15, va fi

$$dD_v = v_z(r) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta, \quad (1.45)$$

Debitul se obține prin dubla integrare, pe secțiunea de curgere; cu înlocuiri și transformări de variabilă necesare se obține:

$$\begin{aligned} D_v &= \int_0^{2\pi} \int_0^R v_z(r) \cdot r \, dr \, d\theta = 2\pi \int_0^R v_z(r) \cdot r \, dr = 2\pi R^2 \int_0^1 v_z\left(\frac{r}{R}\right) \cdot \frac{r}{R} \, d\left(\frac{r}{R}\right) = \\ &= 2\pi R^2 \frac{R^{\varepsilon+1}}{\varepsilon+1} \left(\frac{1}{2m} \cdot \frac{\Delta p}{L}\right)^\varepsilon \cdot \int_0^1 \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\varepsilon+1}\right] \cdot \frac{r}{R} \cdot d\left(\frac{r}{R}\right) = \\ &= 2\pi R^2 \cdot \frac{R^{\varepsilon+1}}{\varepsilon+1} \cdot \left(\frac{1}{2m} \cdot \frac{\Delta p}{L}\right)^\varepsilon \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\varepsilon+3}\right] = \\ &= \frac{\pi \cdot R^3}{\varepsilon+3} \cdot \left(\frac{R}{2m} \cdot \frac{\Delta p}{L}\right) \end{aligned} \quad (1.46)$$

Pentru fluidul newtonian,  $\varepsilon = 1$  și  $m = \mu$ , rezultă ecuația Hagen-Poiseuille

$$D_v = \pi R^4 \Delta p / (8 \mu L) \quad (1.47)$$

Disponând de expresia debitului volumic, se poate calcula viteza medie

$$\bar{v} = \frac{D_v}{\pi \cdot R^2} = \frac{\pi \cdot R^3}{(\varepsilon+3) \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \left(\frac{R}{2m} \cdot \frac{\Delta p}{L}\right)^\varepsilon = \frac{R}{\varepsilon+3} \cdot \left(\frac{\tau_R}{m}\right)^\varepsilon \quad (1.48)$$

Tinând seama de ecuația (1.41) se obține pentru viteza maximă expresia

$$v_0 = \left[\frac{(\varepsilon+3)}{(\varepsilon+1)}\right] \cdot \bar{v}, \quad (1.49)$$

iar pentru viteza locală:

$$v_z(r) = \bar{v} \cdot \frac{\varepsilon+3}{\varepsilon+1} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\varepsilon+1}\right], \quad (1.50)$$

relații utile deoarece viteza medie este ușor calculabilă, după ce se determină inversul indicelui de curgere,  $\varepsilon = 1/n$ , relația (1.38).

Vâscozitatea aparentă este, conform definiției,

$$\eta_a = \tau_{rz} / \left[-(dv_z / dr)\right] = \left\{ m^\varepsilon / [\Delta p / (2L)]^{\varepsilon-1} \right\} \cdot r^{1-\varepsilon}, \quad (1.51)$$

din care rezultă că pentru fluide nenevtoniene există o dependență radială a vâscozității aparente. Această dependență dispăre pentru fluidul newtonian, după cum se poate constata din exponentul razei în relația (1.51).

Pentru PEID extrudată printr-o capilară cu diametrul de 3,2 mm și lungimea de 38,4 mm s-a obținut  $\Delta p = 8,4 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-2}$ . Parametrii reologici a-i topiturii la temperatura de lucru sunt  $n = 0,355$  și  $m = 5,62 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{s}^a \cdot \text{m}^{-2}$  iar valorile efortului de forfecare, ale vitezei de deformare, vâscozității și vitezei de curgere sunt prezentate în tabelul 1.4 și reprezentate grafic în figura 1.16

Tabel 1.4

Nr. crt.	$r \cdot 10^3, [\text{mm}]$	$\tau_{rz} \cdot 10^{-4}, [\text{N m}^{-2}]$	$\dot{\gamma}, [\text{s}^{-1}]$	$\eta \cdot 10^{-4}, [\text{N s m}^{-2}]$	$v_z, [\text{m s}^{-1}]$
1	0	0	0	$\infty$	1.030
2	0.2	2.188	0.07	31.0	1.029
3	0.4	4.376	0.494	8.809	1.025
4	0.6	6.564	1.547	4.216	1.006
5	0.8	8.752	3.48	2.5	0.957
6	1.0	10.94	6.524	1.67	0.859
7	1.2	13.128	10.904	1.197	0.686
8	1.4	15.316	16.833	0.904	0.411
9	1.6	17.504	24.521	0.71	0

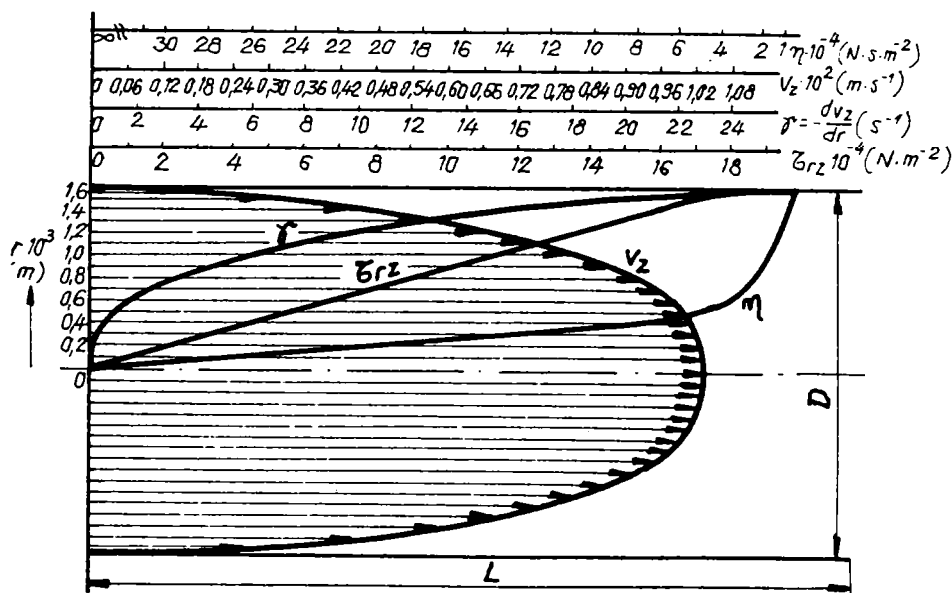


Figura 1.16 Variația vâscozității aparente, vitezei de curgere, vitezei de deformare prin forfecare și a tensiunii de forfecare cu raza, (Mihail, [89])

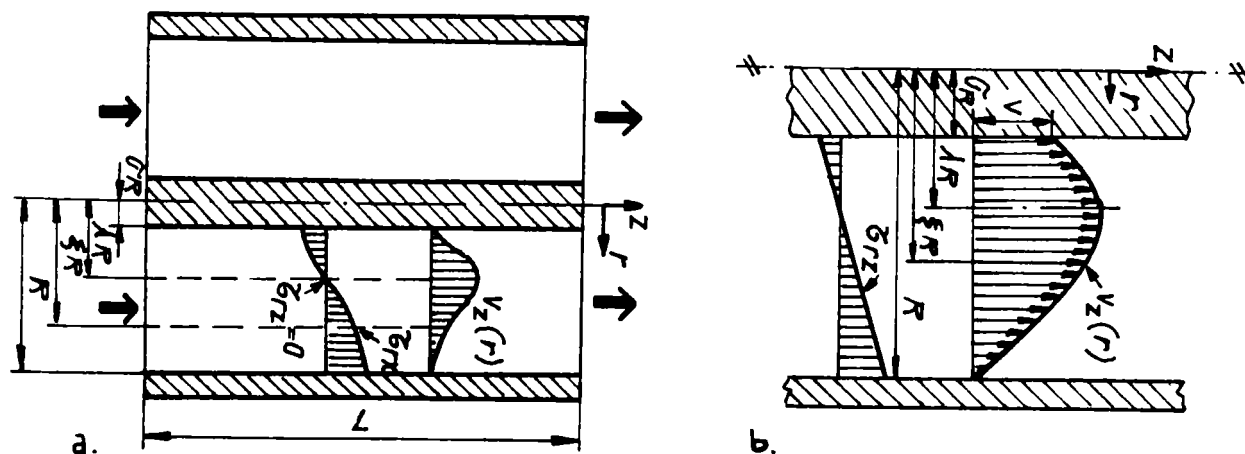


Figura 1.17 Secțiune de curgere inelara

Pentru curgerea prin canal cilindric cu secțiune inelară de raza  $R$  a cilindrului exterior și raza  $\sigma R$  a miezului interior, figura 1.17a, se fac aceleași ipoteze simplificatoare ca și pentru curgerea prin canal cilindric cu secțiune liberă, ecuația constitutivă fiind

$$\tau_{rz} = -m \cdot \left| \frac{dv_z}{dr} \right|^{n-1} \cdot \left( \frac{dv_z}{dr} \right), \quad (1.52)$$

Din ecuația de conservare a momentului liniar în care se înlocuiește gradientul de presiune, prin integrare pe două domenii limitate de razele  $R$  și  $\sigma R$  separate de poziția corespunzătoare maximumului vitezei de curgere,  $\lambda R$ , la care tensiunea de forfecare este nulă, se obține:

$$\tau_{rz}(\xi) = [\Delta p \cdot R / (2L)] \cdot (\xi - \lambda^2 / \xi), \quad (1.53)$$

relație în care  $\xi = r/R$  este coordonata radială adimensională.

Pe baza acestei egalități se determină expresia vitezei maxime de curgere,  $v_0$ , viteza medie de curgere,  $\bar{v}$ , și debitul volumetric,  $D_v$ :

$$v_0 = 2R \cdot \left[ \frac{R}{2m} \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right]^\varepsilon \cdot \int_\sigma^\lambda \left( \frac{\lambda^2}{\xi} - \xi \right)^\varepsilon d\xi, \quad (1.54a)$$

$$\bar{v} = \frac{R}{(1-\sigma^2) \cdot (\varepsilon+3)} \cdot \left[ \frac{R}{2m} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right]^\varepsilon \cdot [(1-\lambda^2)^{\varepsilon+1} - \sigma^{1-\varepsilon} \cdot (\lambda^2 - \sigma^2)^{\varepsilon+1}], \quad (1.54b)$$

$$D_v = \frac{\pi \cdot R^3}{(\varepsilon+3)} \cdot \left[ \frac{R}{2m} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) \right]^\varepsilon \cdot [(1-\lambda^2)^{\varepsilon+1} - \sigma^{1-\varepsilon} \cdot (\lambda^2 - \sigma^2)^{\varepsilon+1}], \quad (1.54c)$$

La extrudarea pentru acoperirea cablurilor cu straturi polimerice, elementul central al filierei de extrudare îl constituie cablul care este tras prin dispozitiv cu viteza constantă  $V$ , profilul de viteză fiind modificat după cum se arată în figura 1.17b.

In acest caz, ecuația constitutivă este:  $\tau_{rz} = -m \cdot \left( \frac{dv_z}{dr} \right)^n, \quad (1.55)$

în baza căreia, menținând semnificația notațiilor  $\sigma$ ,  $\lambda$  și  $\xi$  și considerând pentru simplificare:

$$A = \sqrt{\left( \beta - \frac{1-\sigma^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{\ln \sigma}}, \quad \beta = \int_\sigma^\lambda \left( \xi - \frac{A^2}{\xi} \right) \cdot d\xi,$$

se obțin:

$$v_0 = V + \alpha^\varepsilon \cdot R \int_\sigma^\lambda \left( A^2 / \xi - \xi \right)^\varepsilon d\xi, \quad (1.56a)$$

$$\bar{v} = \frac{V}{1-\sigma^2} \left( \lambda^2 - \sigma^2 + \frac{1}{\beta} \int_\sigma^\lambda |A^2 - \xi^2|^{\varepsilon+1} \cdot \xi^{-\varepsilon} d\xi \right), \quad (1.56b)$$

$$D_v = \pi \cdot R^2 \cdot V \cdot \left( \lambda^2 - \sigma^2 + \frac{1}{\beta} \int_\sigma^\lambda |A^2 - \xi^2|^{\varepsilon+1} \cdot \xi^{-\varepsilon} d\xi \right), \quad (1.56c)$$

### 1.3.4 Ecuatii pentru corelarea proprietăților fizice cu parametrii curgerii

În procesele de prelucrare a polimerilor, parametrii reologici și proprietățile fizice ale topiturii depind de parametrii termodinamici.

Literatura de specialitate furnizează astfel de ecuații de corelare sub mai multe forme, exponențiale sau polinomiale, la utilizarea cărora este acceptat un anumit grad de aproximare a dependenței reale a proprietăților fizice de parametrii curgerii.

Toate aceste relații au o confirmare experimentală, valabilitatea coeficienților și exponenților ce îi conțin fiind, însă, limitată la condițiile de experimentare și determinare.

Pentru cazurile mai des întâlnite în practică și care prezintă interes pentru studiile noastre trebuie menționate (Mihail, [89]):

#### Vascozitatea

$$a). \quad \eta = f \cdot \exp(\Delta E / RT) \cdot |\dot{\gamma}|^{-n}, \quad (1.57)$$

unde R este constanta gazului perfect și temperatura T este exprimată în °K.

Valorile limită pentru viteza de deformare  $\dot{\gamma} = 10 \div 10^4 \text{ s}^{-1}$  iar celelalte constante sunt prezentate în tabelul 1.5.

Tabel 1.5

Nr. crt.	Constante	PEJD	PEID	Polistiren
1	N	0,296	0,345	0,632
2	$f \cdot 10^3, \quad [N \text{ s}^{1-n} \text{ m}^{-2}]$	$0,938 \cdot 10^5$	$1,63 \cdot 10^6$	$0,885 \cdot 10^4$
3	$\Delta E / R, \quad [^\circ K]$	2115	1580	5910

$$b). \quad \eta = m_0 \cdot \exp[-b(T - T_0)] \cdot \dot{\gamma}^{-n}, \quad (1.58)$$

Relație în care, pentru PEJD,  $m_0 = 5,6 \cdot 10^4 \text{ N s}^n \text{ m}^{-2}$ ,  $b = 0,01 \text{ K}^{-1}$ ,  $T_0 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n = 0,345$

pentru PEID,  $m_0 = 4,0334 \cdot 10^3 \text{ N s}^n \text{ m}^{-2}$ ,  $b = 0,010872 \text{ K}^{-1}$ ,  $T_0 = 127 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n = 0,453$

pentru cauciuc,  $m_0 = 4,16 \cdot 10^5 \text{ N s}^n \text{ m}^{-2}$ ,  $b = 0,0448 \text{ K}^{-1}$ ,  $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n = 0,201$

$$c). \quad \eta = m_0 \cdot \exp(E \dot{\gamma} / RT) \cdot \dot{\gamma}^{-n}, \quad (1.59)$$

relație ce ține seama de variația vascozității în raport cu parametrii:  $E \dot{\gamma}$  = energia de activare iar T este temperatura topiturii.

Pentru cauciuc  $m_0 = 0,931 \cdot 10^4 \text{ N s}^n \text{ m}^{-2}$ ,  $E\dot{\gamma} = 0,59 \cdot 10^3 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $n = 0,4$

Pentru PEJD, valorile energiei de activare funcție de viteza de deformare, pentru temperaturi cuprinse între  $108 \text{ }^\circ\text{C}$  și  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ , sunt redată în tabelul 1.6.

Tabel 1.6

Viteza de deformare $\dot{\gamma}$ , [ $\text{s}^{-1}$ ]	0	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$
Energia de activare $E\dot{\gamma}$ , [kcal/mol]	12,8	11,4	10,3	8,5	7,2	6,1

$$d). \quad \lg \eta(T) = \lg \eta(T_s) + C_1 (T - T_s) / [C_2 + (T - T_s)], \text{ ecuatia W L F,} \quad (1.60)$$

Unde  $T_s$  = temperatura standard,  $T_s = T_g + 50$ , [ $^\circ\text{C}$ ],  $C_1 = - 8,86$ ,  $C_2 = 101,6 \text{ }^\circ\text{C}$

Pentru polimerii mai importanți, valorile temperaturii de tranziție vitroasa  $T_g$  sunt (tabelul 1.7.) :

Tabel 1.7

Polimer	Polipropilena	PEJD	PEID	Polistiren	PMMA	Policarbonat	PVC
$T_g$ [ $^\circ\text{C}$ ]	-10	-40	-120	70	90	140	80

$$e). \quad \ln \eta = a_0 + a_1 \cdot \ln \dot{\gamma} + a_{11} \cdot \ln^2 \dot{\gamma} + a_2 \cdot T + a_{22} \cdot T^2 + a_{12} \cdot T \cdot \ln \dot{\gamma}, \quad (1.61)$$

unde  $T$  în [ $^\circ\text{C}$ ] și  $\dot{\gamma}$  în [ $\text{s}^{-1}$ ], valorile coeficienților din aceasta ecuație fiind prezentați în tabelul 1.8.

Tabel 1.8

Nr. crt.	Polimerul	$a_0$	$a_1$	$a_{11}$	$a_2$	$a_{22}$	$a_{12}$
1	<b>PEJD</b>	2,05485	- 0,77168	- 0,44	0,077	-1	0,42
2	<b>PEID</b>	4,49793	- 0,61973	- 2,375	-1,514	1	0,69
3	<b>PP</b>	7,31794	- 0,68104	- 4,198	-3,054	2	1,08
4	<b>PVC</b>	0,76907	0,01062	- 1,749	1,164	-2	-1,38
5	<b>PA 66</b>	6,21969	- 1,26433	- 3,657	0	-2	2,25

### Conductivitatea termica

Pentru variația conductivității termice în procesele de prelucrare a polimerilor se propun legi de variație liniară de tipul:

$$\lambda = C_1 + C_2 \cdot T, \text{ [W / m}\cdot\text{K]} \text{ cu } T \text{ în } ^\circ\text{C}, \quad (1.62)$$

Pentru PEID,  $C_1 = 0,05736$  și  $C_2 = 0,0010467$



## Căldura specifică

Dependența de temperatură a căldurii specifice este deasemenea de forma polinomială

$$c_p = C_3 + C_4 \cdot T, \quad [\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}], \text{ cu } T \text{ în } ^\circ\text{C}, \quad (1.63)$$

## Indicele de curgere

Vâscozitatea aparentă a fluidului neneutronian (topituri de polimeri) poate fi exprimată prin relații de tip Arrhenius:

$$\eta_a = A_1 \cdot \exp(-E \dot{\gamma}_{yz} / RT), \quad (1.64)$$

$$\eta_a = A_2 \cdot \exp(-E \tau_{yz} / RT)$$

Pentru fluidul newtonian  $E \dot{\gamma}_{yz} = E \tau_{yz}$  în timp ce pentru fluidul pseudoplastic, ( $n < 1$ )

$$E \tau_{yz} / E \dot{\gamma}_{yz} = 1 - \dot{\gamma}_{yz} [d\eta_a / d\tau_{yz}], \quad (\text{Huynh, [63]}), \quad (1.65)$$

Se definește indicele de curgere  $n$  ca raport dintre energia de activare la viteza de deformare constantă  $E \dot{\gamma}_{yz}$  și energia de activare la tensiune de forfecare constantă  $E \tau_{yz}$ :

$$n = E \dot{\gamma}_{yz} / E \tau_{yz} \quad (1.66)$$

Pentru domeniul liniar, newtonian, al curgerii valorile informative ale energiei de activare  $E \dot{\gamma}_{yz} = E \tau_{yz} = \Delta E$  sunt:

PEID  $\Delta E = 6 \div 7 \text{ kcal/mol (150 } \div \text{ 300}^\circ\text{C)}$ ;

PEJD  $\Delta E = 11 \div 13 \text{ kcal/mol (150 } \div \text{ 300}^\circ\text{C)}$ ;

PP  $\Delta E = 11 \text{ kcal/mol (195 } \div \text{ 260}^\circ\text{C)}$ ;

PC  $\Delta E = 18,7 \div 26 \text{ kcal/mol (230 } \div \text{ 335}^\circ\text{C)}$ ;

PS  $\Delta E = 25,5 \text{ kcal/mol (190 } \div \text{ 260}^\circ\text{C)}$ .

După cum rezultă din relația (1.3) și figura 1.4, valoarea energiei de activare aparentă variază cu temperatura, valori maxime fiind atinse pentru valori de temperatura vecine ( $\pm 10^\circ$ ) temperaturii de vitrifiere.

### 1.3.5 Model matematic pentru curgerea cu alunecare la perete

Pentru curgerea Poisseuille, modelul cel mai simplu de curgere laminară printr-un tub capilar de raza  $R$ , tensiunea de forfecare este nulă în centrul secțiunii de curgere și tinde spre o valoare maximală în vecinătatea peretelui

$$\tau_r = \frac{r \cdot \Delta p}{2 \cdot \Delta z} = \frac{r \cdot \Delta p}{2 \cdot \Delta L}, \quad (1.67)$$

unde:  $r$  = coordonata radială a punctului curent,  $r = 0 \dots R$ , unde  $R$  = raza tubului capilar;

$L$  = lungimea filierei;

$p$  = diferența de presiune aplicată între extremitățile tubului,  $p_1 - p_0$ , figura 1.14.

Expresia este valabilă, pentru curgerea laminară prin secțiune infinită, oricare ar fi legea și modelul teoretic abordat. Pentru situații reale (secțiune de curgere finită) se poate neglija efectul extremităților, astfel încât  $dp/dz$  este constant, iar tensiunea de forfecare la perete va fi:

$$\tau_R = \tau_p = \frac{R \cdot p}{2L} \text{ și } \tau_r = \frac{r \cdot p}{2 \cdot L}, \text{ (Huynh [63])}, \quad (1.68)$$

Prin secțiunea inelară limitată de cilindrii de rază  $r$  și  $r + dr$ , , figura 1.15, curge debitul

$$dQ = 2\pi \cdot r \cdot v(r), \quad (1.69)$$

unde  $v(r)$  = viteza de curgere a fluidului situat la raza  $r$  de axa secțiunii transversale circulare de curgere, distribuția de viteza fiind cea prezentată în figura 1.14.

Debitul transferat prin secțiunea transversală de curgere a capilareii este:

$$Q = \int_0^R 2\pi \cdot r \cdot v(r) \cdot dr = 2\pi \cdot \int_0^R r \cdot v(r) \cdot dr, \quad (1.70)$$

Integrând prin părți se obține:

$$Q = 2\pi \cdot \left[ \left. \frac{r^2}{2} \cdot v(r) \right|_0^R - \int_0^R \frac{r^2}{2} \cdot dv \right], \quad (1.71)$$

În ipoteza clasică a aderenței la perete,  $v(R) = 0$ , primul termen se anulează, modelul matematic fiind dezvoltat în continuare luând în considerare doar al doilea termen.

Dacă  $v_a$  este viteza de alunecare la perete, astfel încât  $v(R) = v_a$ , debitul total transferat prin capilară devine, conform (1.71)

$$Q = 2\pi \cdot \frac{R^2}{2} \cdot v_a - 2\pi \cdot \int_0^R \frac{r^2}{2} \cdot dv = Q_a - 2\pi \cdot \int_0^R \frac{r^2}{2} \cdot dv, \quad (1.72)$$

relație în care  $Q_a = \pi \cdot R^2 \cdot v_a$  reprezintă fracțiunea de debit asociată manifestării fenomenului de alunecare sau modificării comportamentului reologic al fluidului în vecinătatea peretelui.

Al doilea termen al egalității este fracțiunea de debit asociată curgerii prin forfecare a

$$\text{fluidului } Q_f = -2\pi \cdot \int_0^R \frac{r^2}{2} \cdot dv, \quad \text{astfel încât } Q = Q_a + Q_f \text{ si} \quad (1.73)$$

$$Q_f = Q - Q_a = Q - \pi \cdot R^2 \cdot v_a, \quad (1.74)$$

$$\text{Deoarece } \dot{\gamma} = -\frac{dv}{dr} = f(\tau_r) \text{ si } \tau_r = r \cdot p / 2L \text{ si } \tau_p = R \cdot p / 2L, \quad (1.75)$$

$$\text{atunci } r = \frac{R \cdot \tau_r}{\tau_p}, \text{ si } dr = \frac{R}{\tau_p} \cdot d\tau_r, \quad (1.76)$$

$$\text{astfel încât } dv = -\dot{\gamma} \cdot \frac{R}{\tau_p} \cdot d\tau_r = -f(\tau_r) \cdot \frac{R}{\tau_p} \cdot d\tau_r. \quad (1.77)$$

Din relațiile (1.73) și (1.77) se deduce expresia debitului  $Q_f$  ca funcție de solicitarea de forfecare:

$$Q_f = -\pi \cdot \int_0^R r^2 \cdot dv = \pi \cdot \int_0^{\tau_p} \frac{R^3 \cdot \tau_r^2}{\tau_p^3} \cdot f(\tau_r) \cdot d\tau_r, \quad (1.78)$$

Pentru fluide newtoniene

$$\dot{\gamma} = f(\tau_r) = \frac{\tau_r}{\eta_a}, \text{ astfel încât relația (1.78) devine}$$

$$Q_f = \pi \cdot \int_0^{\tau_p} \frac{R^3 \cdot \tau_r^3}{\eta_a \cdot \tau_p^3} \cdot d\tau_r, \quad (1.79)$$

$$\text{sau } \frac{Q_f}{\pi \cdot R^3} = \frac{1}{\tau_p^3 \cdot \eta_a} \cdot \int_0^{\tau_p} \tau_r^3 \cdot d\tau_r, \text{ sau } \frac{4Q_f}{\pi \cdot R^3} = \frac{\tau_p}{\eta_a} = \dot{\gamma}_{pa}, \quad (1.80)$$

relație ce exprimă gradientul de viteză de forfecare aparent, la perete, pentru un fluid newtonian.

Pentru fluide ne-newtoniene, ecuația (1.78) sub forma

$$\frac{Q_f}{\pi \cdot R^3} \cdot \tau_p^3 = \int_0^{\tau_p} \tau_r^2 \cdot f(\tau_r) \cdot d\tau_r, \quad (1.81)$$

se poate deriva aplicând regula lui Leibnitz pentru derivarea unei integrale definite și se obține:

$$\frac{3Q_f}{\pi \cdot R^3} + \tau_p \cdot \frac{d(Q_f / \pi \cdot R^3)}{d\tau_p} = f(\tau_p), \quad (1.82)$$

relație care, în baza egalității  $\dot{\gamma} = -\frac{dv}{dr} = f(\tau_r)$ , se mai poate scrie și sub forma

$$\dot{\gamma}_p = \frac{1}{\pi \cdot R^3} \cdot \left[ 3Q_f + \tau_p \cdot \frac{dQ_f}{d\tau_p} \right], \quad (\text{relația Rabinowitsch - Mooney}) \quad (1.83)$$

Deoarece

$$\frac{d(\log y)}{dy} = \frac{1}{y} \quad \text{și} \quad \frac{d(\log x)}{dx} = \frac{1}{x} \quad \text{se poate deduce} \quad \frac{x \cdot dy}{dx} = y \cdot \frac{d(\log y)}{d(\log x)} \quad (1.84)$$

Din relațiile (1.82), (1.83), (1.84) cu  $x = \tau_p$  și  $y = 4Q_f / \pi \cdot R^3$  se obține

$$\dot{\gamma}_p = \frac{3}{4} \cdot \left( \frac{4Q_f}{\pi \cdot R^3} \right) + \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{4Q_f}{\pi \cdot R^3} \right) \cdot \frac{d \log(4Q_f / \pi \cdot R^3)}{d \log \tau_p}, \quad (1.85)$$

Se definește indicele de curgere a fluidului:

$$\frac{1}{n} = \frac{d \log(4Q_f / \pi \cdot R^3)}{d \log \tau_p}, \quad \text{astfel încât ecuația (1.83) se poate scrie:}$$

$$\dot{\gamma}_p = \frac{3n+1}{4n} \cdot \dot{\gamma}_{pa}, \quad (\text{ecuația Rabinowitsch - Metzner}) \quad (1.86)$$

relație în care  $(3n+1) / 4n$  este termenul de corecție Rabinowitsch.

Ecuația (1.86) se aplică la debitul  $Q_f$  asociat curgerii prin forfecare, în zona I a curbelor de curgere, și nu debitului total (Durand, [43]) astfel încât exprimând  $\dot{\gamma}_{pa}$  conform relației (1.80) și ținând seama de relația (1.74), relația (1.86) devine:

$$\dot{\gamma}_p = \frac{3n+1}{4n} \cdot \left( \frac{4Q_f}{\pi \cdot R^3} \right) = \frac{3n+1}{4n} \cdot \left( \frac{4Q}{\pi \cdot R^3} - \frac{4v_a}{R} \right), \quad (1.87)$$

$$\text{cu} \quad n = \frac{d \log \tau_p}{d \log \left( \frac{4Q_f}{\pi \cdot R^3} \right)}, \quad (1.88)$$

### Algoritm pentru determinarea vitezei de alunecare la perete

Condițiile particulare ale programului de experimentare derulat permit modificarea condițiilor la limita (în vecinătatea peretelui) în timpul extrudării, prin aplicarea activării ultrasonice fără a modifica nici un alt parametru de reglaj al procesului. Se poate considera ca extrudarea se efectuează în zona I de curgere astfel încât fluidul are o comportare reologica newtoniana și, în vecinătatea peretelui, viteza de deplasarea topiturii este neglijabilă (teoretic  $v_a = 0$ ).

În urma aplicării activării ultrasonice se constată extrudarea materialului cu debitul  $Q$ , valoare semnificativ mai mare decât  $Q_0$  care sugerează modificarea condițiilor de deplasare a fluidului la interfața fluid / perete (sau în imediata vecinătate a acesteia). Se poate considera  $v_a$  ca fiind valoarea vitezei de deplasare a fluidului în vecinătatea peretelui,  $v_a \neq 0$ , valoarea acesteia putând fi determinată după următorul algoritm:

- se determină gradientul de viteză de forfecare aparent  $\dot{\gamma}_{pa} = \frac{4Q_f}{\pi \cdot R^3}$ , (1.89)

și solicitarea de forfecare aparentă  $\tau_{pa} = \frac{R \cdot p}{2L} = \frac{D}{L} \cdot \frac{F}{\pi \cdot (2R)^2}$ , (1.90)

astfel încât vâscozitatea aparentă va fi:  $\eta_a = \frac{\tau_{pa}}{\dot{\gamma}_{pa}}$ , (pentru  $v_a = 0$ ), (1.91)

- se determină indicele de curgere  $n$  folosind relația  $\frac{1}{n} = \frac{d \log(4Q_f / \pi \cdot R^3)}{d \log \tau_p}$ , (1.92)

pentru mai multe valori de tensiune de forfecare  $\tau_p$  ;

- dat fiind caracterul ne-newtonian al curgerii, gradientului de viteză de forfecare aparent  $i$  se aplică corecția Rabinovich ce ține cont de valoarea indicelui de curgere "n" particularizat pentru condițiile de experimentare și pentru materialul de studiat astfel încât, se poate calcula

gradientul de viteză de forfecare  $\dot{\gamma}_p = \frac{3n+1}{4n} \cdot \dot{\gamma}_{pa}$ , (1.93)

- din (14) se poate determina viteza de alunecare la perete :

$$v_a = R \cdot \left( \frac{Q}{\pi \cdot R^3} - \dot{\gamma}_p \cdot \frac{n}{3n+1} \right), \quad (1.94)$$

În aceste relații:

$R$  = raza secțiunii de ieșire din filieră;

$F$  = sarcina aplicată pentru generarea presiunii asupra topiturii;

$D$  = diametrul pistonului din cilindru de plastifiere;

$Q_f$  = debitul extrudat în următoarele condiții:

- curgere laminară în zona I a curbei de curgere, produsul extrudării nu prezintă defecte;
- tensiune de forfecare redusă și alunecare la perete neglijabilă;
- nu se aplică activarea ultrasonică.

$Q$  = debitul extrudat în urma aplicării activării ultrasonice;

$v_a$  = viteza de alunecare la perete ca urmare a activării ultrasonice.

**Observatie:** Pentru aplicația practică, în cazul dispozitive finale de procesare cu element central (duze de injectare, capete de extrudare) asupra căruia se aplică activarea ultrasonica, se pot considera valorile astfel obținute ca fiind afectate de erori deoarece nu s-a ținut seama de modificarea (creșterea) temperaturii ca efect al activării ultrasonice fapt ce duce, implicit, la scăderea vâscozității topiturii. În cazul vitezelor mari de curgere, când acest fenomen nu mai este neglijabil, pentru a realiza o corecție satisfacatoare se pot folosi relațiile din capitolul 1.3.4, d, e pentru corelarea proprietăților fizice cu parametrii curgerii.

## **1.4. Influența condițiilor de procesare asupra calității produselor**

### **1.4.1. Defecte ale produselor extrudate**

#### **1.4.1.1. Clasificare. Condiții de manifestare**

Pierderea calității în procedeele de prelucrare a materialelor polimerice se poate manifesta printr-o gamă largă de defecte, de la simpla alterare a aspectului suprafeței produsului (calandrare, extrudare, injecție) până la extinderea perturbării curgerii în volumul materialului (neomogenități în volumul produsului sau chiar ruperea extrudatului / produsului calandrării), Larson [71], ANEXA 1.

Aceste defecte sunt strâns legate de comportarea reologică a topiturii de polimer și se poate spune că induc o limitare a productivității procedeele de punere în formă deoarece apariția defectelor este asociată declansării unei instabilități de curgere a topiturii care se manifestă la depășirea unei valori critice a vitezei de curgere.

Cercetarea fenomenologică a instabilității de curgere poate oferi posibilități de îmbunătățire a procedeele în cauza. Dintre acestea extrudarea este acceptată ca procedeu clasic de definire a comportării reologice a materialelor polimerice, rezultatele experimentale putând fi extrapolate pentru celelalte procedee de punere în formă a polimerilor.

La extrudarea fiecărui tip de polimer pot apărea defecte particulare funcție de condițiile de procesare și de proprietățile intrinseci ale materialului.

O primă clasificare a defectelor se bazează pe observarea morfologiei produsului extrudării și definește două clase de defecte:

- defecte de suprafață sau superficiale - riduri perpendiculare la direcția de curgere. Funcție de gradul de manifestare - frecvență și adâncimea acestor riduri – pot determina pierderea luciului suprafeței extrudatului sau, în cazuri extreme, obținerea unui extrudat cu suprafața rugoasă, așa numita "piele de rechin".
- defecte de volum, caracterizate de extinderea perturbării curgerii topiturii în volumul materialului. Dintre acestea, cel mai frecvent întâlnit este "defectul (curgerea) helicoidal(ă)" iar ca formă extremă de manifestare, "curgerea haotică", figura 1.18a.

Intotdeauna un defect de volum este precedat de un defect de suprafață, de mai mica importanță, dar este dificil și lipsit de interes aplicativ a stabili condițiile trecerii de la o categorie

la cealalta, scopul cercetărilor experimentale în acest domeniu fiind de a găsi condițiile extreme de procesare pentru care produsul extrudării este lipsit de defecte (curgerea este încă laminară).

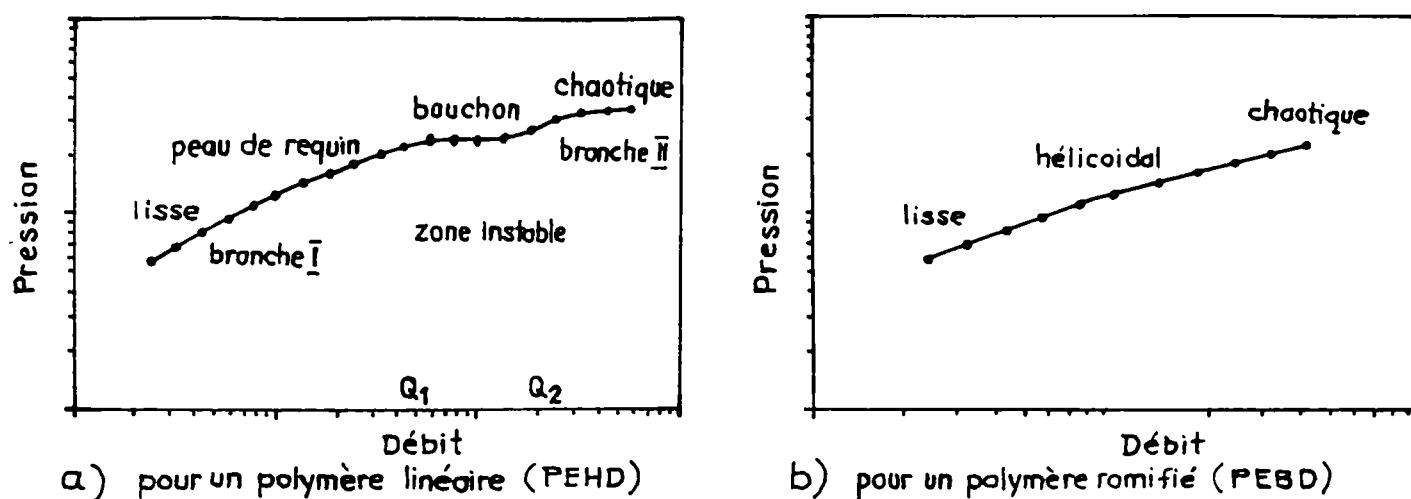


Figura 1.18 Principalele defecte de extrudare și poziționarea zonelor de manifestare pe curbele de curgere (Agassant, [3])

O a doua clasificare a defectelor ține seama de particularitățile morfologice ale macromoleculii și de efectul acestora asupra comportării reologice a materialului topit. Se stabilesc astfel două categorii, funcție de tipul de polimer reprezentativ pentru fiecare, Den Otter [39]:

- defecte tip PEJD (polietilena de joasă densitate). Se manifestă în cazul polimerilor ramificați sau cu o puternică încărcare sterică: PEJD, PS, (PP) pentru care apariția defectelor respectă următoarea succesiune: pierderea luciului, defect helicoidal, defect haotic, curbele de curgere (presiune – debit) fiind continuu crescătoare, figura 1.18b;
- defecte tip PEID (polietilena de înaltă densitate). Se manifestă la extrudarea polimerilor liniari: PEID, PEJDL, siliconi, polibutadiene, poliisoprene, succesiunea de apariție a defectelor fiind: piele de rechin, curgere sacadată (cunoscută sub denumirile: "defect de tip buson", "defect bambus", defect "plug flow" sau defect "stick-slip"), curgere haotică, curbele de curgere debit – presiune fiind caracterizate de o discontinuitate evidentă manifestată prin existența a două ramuri stabile, zona I și II, Bagley [13],[14], separate de o zonă intermediară, instabilă, figura 1.18a.

Pentru curgere în zona I, în cazul extrudărilor realizate cu material cărui, la un moment dat i se adaugă colorant pentru vizualizarea liniilor de curgere, o secțiune transversală prin produsul extrudării pune în evidență partea centrală colorată și un strat fin, incolor și de grosime uniformă numit "piele", în apropierea peretelui.



Autorii unor astfel de studii, Metzger [84], [86] și Hamilton [86], Bergem [21], Benbow și Lamb [20], El Kissi [48], Bartos și Holomek [17], nu fac referiri la viteza de deplasare a topiturii în vecinătatea peretelui dar concluzionează că are loc o curgere axisimetrică și liniară și că nu există alunecare la perete în acest domeniu de curgere, Durand, [43], curgerea fiind stabilă și laminară.

Pentru zona II de curgere s-a constatat că nu se mai respectă axisimetria curgerii, pielea extrudatului prezentând variații de grosime neuniforme pe circumferință. În acest caz perturbarea ar putea avansa până spre suprafața extrudatului generând defecte ale acestuia sau chiar rupturi ale extrudatului, Oyanagi, [96].

În studiile lor, Den Otter [40], El Kissi și Piau [47], remarcă absența alunecării la perete în zona I, chiar și în zona II, de apariție a defectului buson, dar în articolele lor acești cercetători nu exclud posibilitatea glisării materialului la peretele filierei pentru condiții extreme de temperatură și presiune (sau debit) care ar putea schimba condițiile la limită în vecinătatea peretelui filierei. Contradicțiile dintre concluziile acestor autori și lucrările multor alți cercetători în domeniu sunt generate de diferențele de detaliu ale condițiilor de experimentare.

Majoritatea studiilor ce au abordat subiectul alunecării la perete nu s-au bazat pe măsurarea directă a profilului de viteză ci au interpretat curbele reologice presiune – debit pentru a găsi eventuale dependențe dintre comportamentul reologic și condițiile de procesare.

Există, de asemenea, studii care cuantifică viteza de curgere în imediata vecinătate (amgstromi) a peretelui (Migler și Leger, [87]) sau care pun în evidență pe baza unui suport matematic apariția alunecării topiturii pe interfața fluid-perete pentru anumite condiții reologice (Giorgiou și Crocket [54], Hatzikiriakos și Dealy [58], [59]).

Alte studii experimentale reprezentative, Maxwell și Galt [80], pun în evidență, chiar și în zona I, existența deplasării fluidului în vecinătatea peretelui după o schemă alternativă alunecare–adeziune (stick-slip) cu viteză de valoare mică și neglijabilă în raport cu viteza medie de curgere. Ramamurthy [100] asociază debutului manifestării defectului piele de rechin o diminuare bruscă a pantei curbei de curgere (punctul  $C_1$ ), în vecinătatea solicitării de 0,14 Pa și atribuie această modificare de pantă declanșării alunecării la perete.

Cercetări mai recente, Leger și Migler [87], confirmă această supoziție constatând deplasări ale fluidului în raport cu peretele chiar pentru solicitări de forfecare reduse.

Pentru zona II de curgere în care se manifestă defectul "bouchon" sau "stick-slip", figura 1.18b, cercetările de velocimetrie ale lui Bartos și Holomek [17] constată o dispersie importantă

a valorilor vitezei de curgere pentru o rază dată (dispersie de 25 de ori mai mare în zona II față de zona I de curgere).

Faptul că fluctuațiile de viteză sunt atât spațiale cât și temporale relevă existența unei viteze de alunecare la perete de valoare deloc neglijabilă în raport cu viteza maxima de curgere. Aceste observații coincid cu concluziile studiilor lui El Kissi [47], [48], care a măsurat profilul de viteză la intrarea și iesirea din filieră și a constatat că acestea sunt cvasi-superpozabile ca urmare a manifestării efectului de intrare-ieșire din filieră.

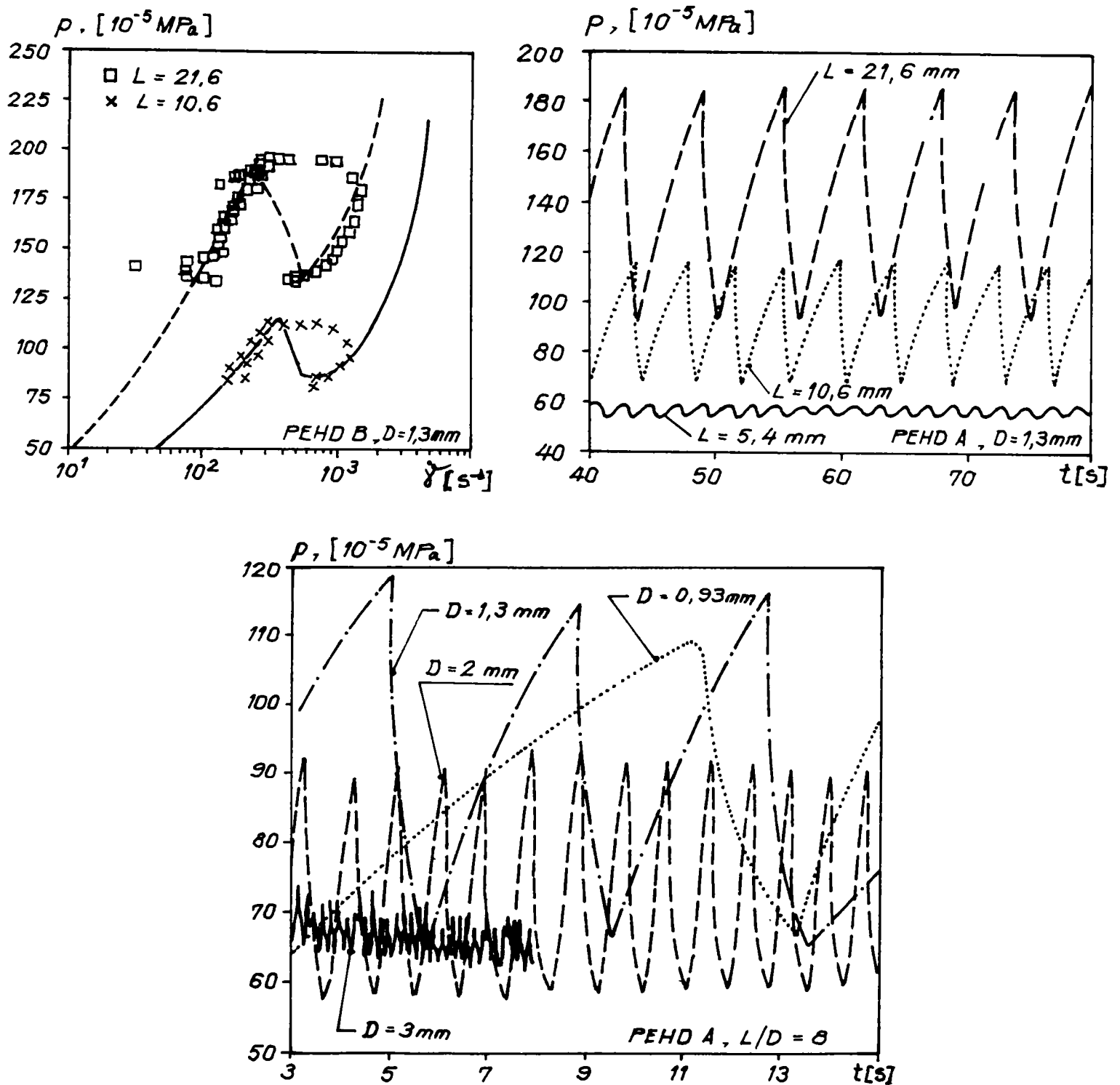


Figura 1.19 Diagrama  $p(t)$ - $q(t)$  la extrudarea PEJD prin filiere de geometrie diferită

#### 1.4.1.2. Oscilații de relaxare (piezodependenta)

Oscilațiile auto-întretinute ale topiturii extrudate au fost studiate de Van der Pol [122] care le-a denumit oscilații de relaxare. Dat fiind rolul nefast pe care declanșarea acestui fenomen o are asupra calității extrudatului, condițiile de instalare a regimului vibrator, forma oscilațiilor și evoluția lor în raport cu diferitele variabile ale sistemului constituie subiectul cercetărilor mai recente asupra instabilității (defectului) de tip "bușon" sau "bambus". Pentru modelarea matematică a fenomenului, în scopul simulării acestuia s-a definit un sistem de două ecuații diferențiale de ordinul întâi ( $dp/dt$  și  $dQ/dt$ ) care permite descrierea sistemului oscilant printr-o relație debit – presiune, funcție nemonotonă, care admite evoluția sistemului după un ciclu de histerezis, figura 1.19 (Durand, [43]), pentru anumite condiții de lucru.

În 1978, Weill [128] a asimilat ansamblul container de plastifiere – filieră cu un sistem capacitiv – rezistiv în care capacitatea este reprezentată de produsul  $\chi \cdot V$  iar rezistența este o funcție de geometria filierei și vâscozitatea fluidului, figura 1.20a (Kuttruff, [70]). Acest model a permis evaluarea, din punct de vedere calitativ și ca ordin de mărime, a variațiilor periodice ale debitului de ieșire în raport cu diferiți parametri de procesare și exprimă comportarea vâsco-elastică a volumului topiturii.

Necesitatea aprofundării studiului comportării reologice a macromoleculelor a avut drept rezultat discretizarea comportamentului vâsco-elastic la nivelul segmentelor mobilizate ale macromoleculelor și elaborarea modelului "halterei elastice", figura 1.20b, potrivit căruia acțiunile hidrodinamice ale mediului înconjurător (macromoleculele învecinate) se presupun a fi concentrate la extremitățile segmentelor de lanț macromolecular mobilizate, reprezentate prin două sfere, (Agassant, [3]). Resortul ce unește aceste două sfere reprezintă segmentul de lanț mobilizat, care nu are o configurație spațială liniară, dispus fiind în ipoteticul "tub molecular", figura 1.20c (Benallal, [19]), sub o forma neordonată, corespunzătoare nivelului energetic minimal. Orice acțiune exterioară asupra capetelor lanțului (sferelor) scoate nodurile segmentului din poziția lor de echilibru iar tendința de a reveni la aceasta poate fi echivalată, din punct de vedere fenomenologic, cu acțiunea resortului de constanta elastică  $k$ .

Pentru Den Otter [40] defectele manifestate la extrudare se datorează depășirii unui prag energetic începând de la care macromoleculele ies din întrepătrunderea specifică pelotei statistice. Vinogradov [126], [127] precizează că o astfel de stare este compatibilă cu fenomenele de ruptură coezivă și de detașare de pe suprafața de contact, ambele fenomene fiind incompatibile cu starea lichidă.



Figura 1.20 Model mecanic elastic echivalent pentru comportarea topiturilor de polimeri  
(Kuttruff, [70] Agassant, [3] Benallal [19] )

Lin [74], pe baza modelului Doi-Edwards și a rezultatelor cercetărilor lui Vinogradov, consideră macromolecula ca o entitate solidă elastică; emite ipoteza că acest fenomen ar fi generat de "întinderea" lanțurilor macromoleculare, fapt ce are drept rezultat o cvasi-orientare a acestora în direcția curgerii și diminuarea rezistenței de curgere dar și creșterea zonală a energiei interne. Procesul este reversibil astfel încât, într-o fază imediat următoare, are loc o repliere a macromolecului în baza tendinței acesteia de a reveni spre poziții de energie minimală. Se demonstrează că maximumul curbei nemonotone astfel obținute corespunde tensionării critice specifice condițiilor de apariție a defectului "stick-slip" și intrării materialului în starea cauciucată (Vinogradov).

Această supoziție explică instabilitatea procesului, variațiile ciclice de debit și presiune la ieșirea din filieră, și evoluția după un ciclu histerezis în zona instabilă, figura 1.19, 1.21.

Astfel, la extrudarea PEID printr-o filieră caracterizată de diametrul secțiunii de ieșire  $D = 1,89 \text{ mm}$  și lungimea  $L = 22,2 \text{ mm}$  (Beaufils [18]), dacă se urmărește evoluția presiunii pentru debite reduse ( $Q'$  sau  $\dot{\Gamma}$ ) de valori crescătoare impuse, se constată existența unui palier de presiune începând cu punctul  $C_1(Q_{C1}, p_{C1})$  care definește presiunea maximală de oscilație,  $p_{C1} = p_{max}$ ,  $Q_{C1} = 12 \div 15 \text{ mm}^3/\text{s}$ , figura 1.21a, (Durand [43]).

Impunând în continuare valori continuu crescătoare ale debitului,  $Q = 15 \div 50 \text{ mm}^3/\text{s}$ , se constată manifestarea succesivă a defectelor de suprafață: pierderea luciului suprafeței extrudatului, ridarea ușoară a acestuia, accentuarea ridurilor, ca urmare a oscilațiilor de presiune,  $p \in p_{min} \div p_{max}$ , ce caracterizează zona de tranziție.

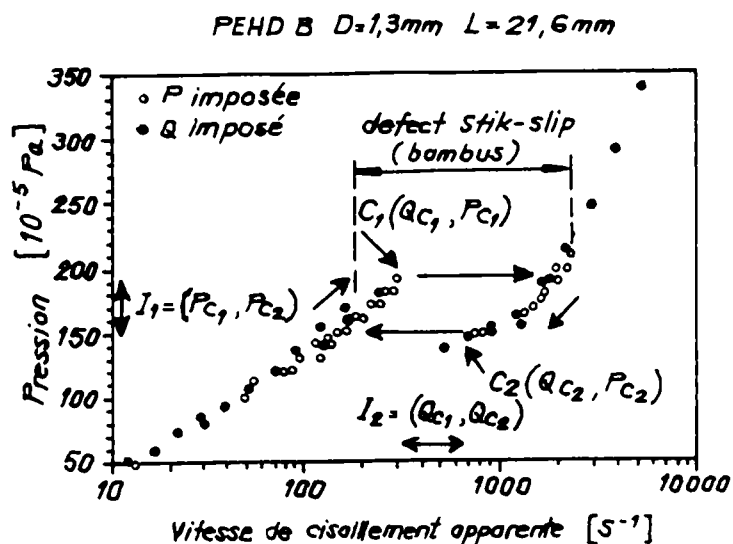
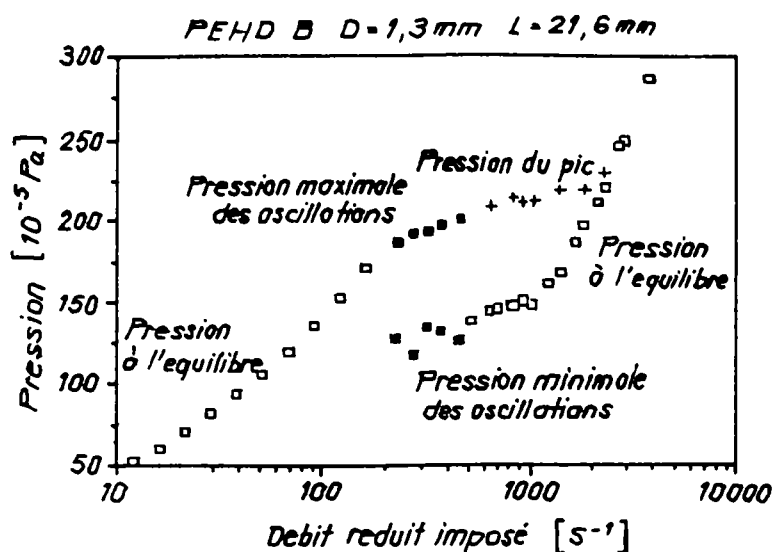


Figura 1.21 Curbe de curgere presiune-debit redus (viteza de forfecare aparenta) pentru PEID

“ Defectul buşon” se manifestă pentru perechi de valori ce depăşesc coordonatele punctului  $C_2(Q_{C2}, p_{C2})$ . Poziţia acestui punct se poate determina procedând la impunerea unor valori continuu descrescătoare ale debitului redus (sau ale vitezei de forfecare aparentă) şi urmărind evoluţia presiunii la ieşirea din filieră.

Acest punct marchează debutul unui al doilea palier, definind presiunea minimă de oscilaţie,  $p_{C2} = p_{min}$ .

Aceasi formă a reprezentării grafice (în aceleasi coordonate) se obţine şi dacă se impune evoluţia progresiv crescătoare a presiunii (apoi descrescătoare, pentru obţinerea celui de-al doilea palier) şi se urmăreşte debitul redus, figura 1.21b.

- Se constată ca, în vecinătatea punctului  $C_1$ , o uşoară creştere a presiunii de la  $190 \cdot 10^5$  Pa la  $200 \cdot 10^5$  Pa provoacă un salt important de debit, acesta fiind multiplicat de până la 7 ori (de la  $64 \text{ mm}^3/\text{s}$  la  $460 \text{ mm}^3/\text{s}$ ).
- Procedând la scaderea progresivă a presiunii, deasemenea se manifestă o scădere bruscă de debit dar în vecinătatea punctului  $C_2$ , pentru presiunea de lucru de  $150 \cdot 10^5$  Pa ( $\Delta p = 40 \cdot 10^5$  Pa) pentru care debitul variază brusc de la 160 la  $30 \text{ mm}^3/\text{s}$ .

Există, deci :

- un interval de debite ( $Q_{C1}, Q_{C2}$ ) în care presiunea nu se stabilizează ;
- un interval de presiuni ( $p_{C2}, p_{C1}$ ) în care fiecărei valori ale presiunii îi pot corespunde două valori de debit stabil, una situată în zona I de curgere şi cealaltă în zona II, trecerea de la o valoare la alta fiind bruscă.

### 1.4.1.3. Viteza de alunecare la perete. Influența masei moleculare

Concluziile anterioare sunt verificate experimental și prin rezultatele experimentale ale cercetătorilor El Kissi și Piau [47], figura 1.22, care demonstrează, în plus, că viteza de alunecare la perete are valori particularizate pentru fiecare polimer în parte ca efect a diferențelor de masă moleculară.

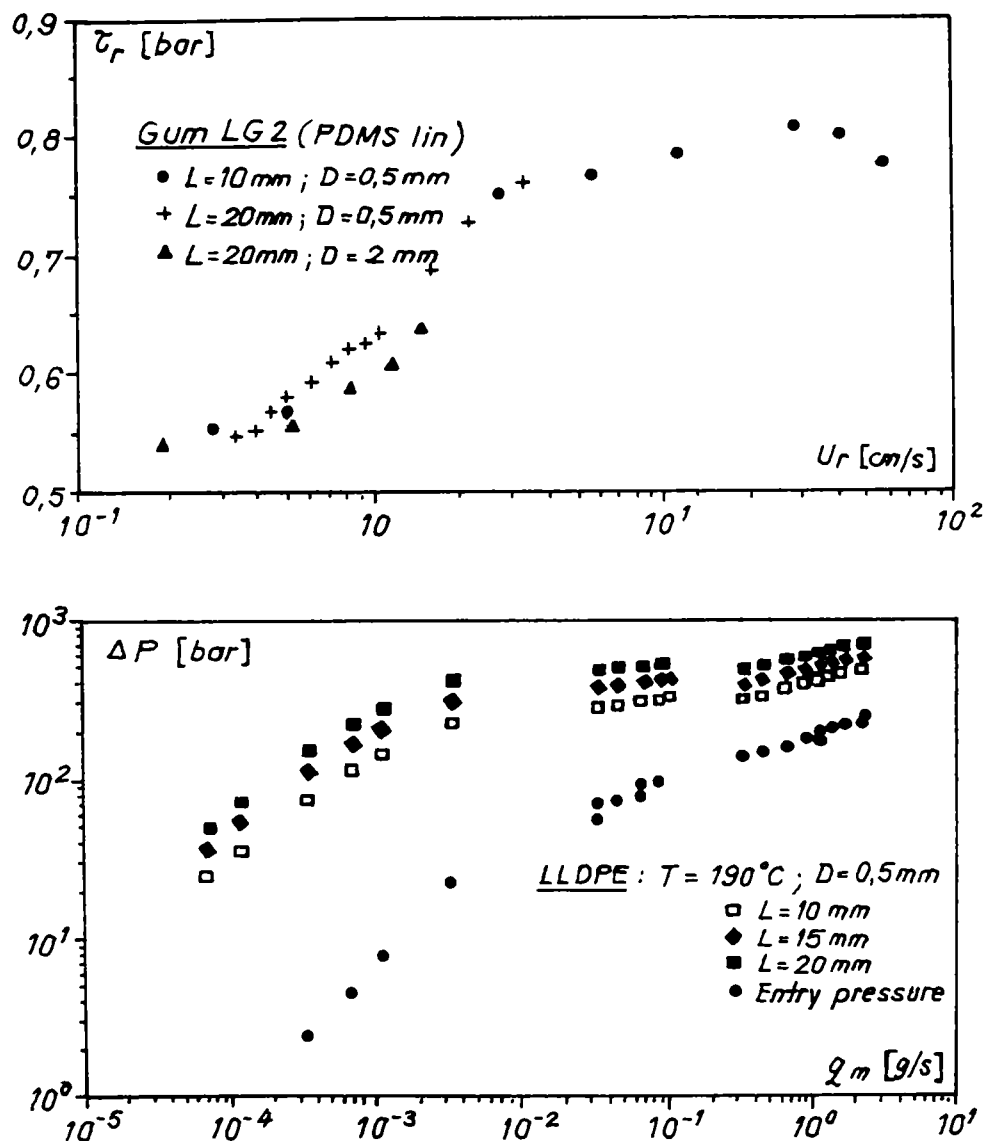


Figura 1.22 Discontinuități ale vitezei de alunecare la perete calculate prin diferențe de debit pentru PEJDL, (El Kissi și Piau [47])

Majoritatea cercetărilor având această temă exploatează concluziile lui Mooney care emite ipoteza ca viteza de alunecare la perete,  $W_g$  este o funcție de o singură variabilă: tensiunea de forfecare la perete, conform relației:

$$\dot{\gamma}_{app} = \dot{\gamma}_{app\ cis} + 4 W_g(\tau) / R, \quad (1.100)$$

astfel încât, la solicitare constantă, reprezentarea grafică a vitezei de forfecare aparentă ( $\dot{\gamma}_{app}$ ) funcție de raza R a filierei este o dreaptă (Ramamurthy [99], Lupton [76])

- a cărei pantă este direct proporțională cu viteza de alunecare la perete;
- și a cărei ordonată la origine corespunde vitezei de forfecare, înainte de aplicarea corecției Rabinovitsch ( $\dot{\gamma}_{app\,cis}$ ), figura 1.23, 1.24

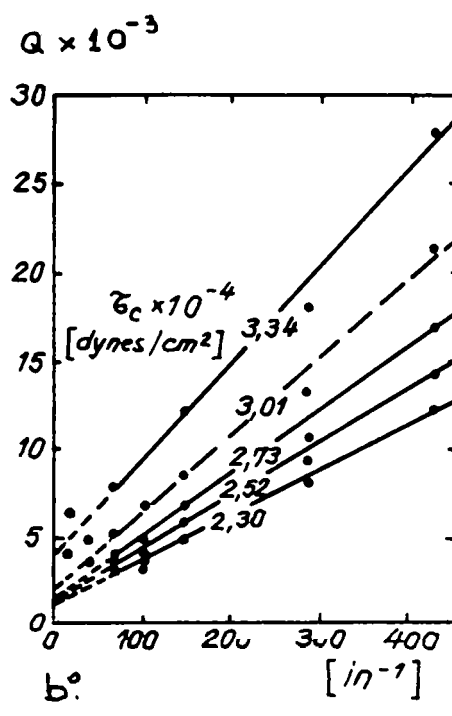
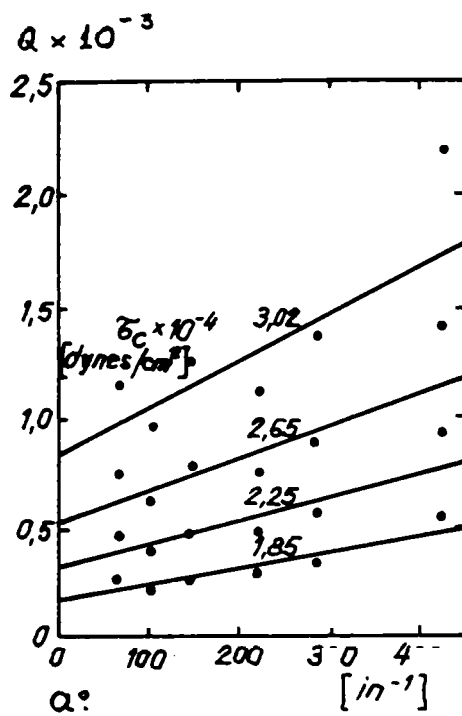
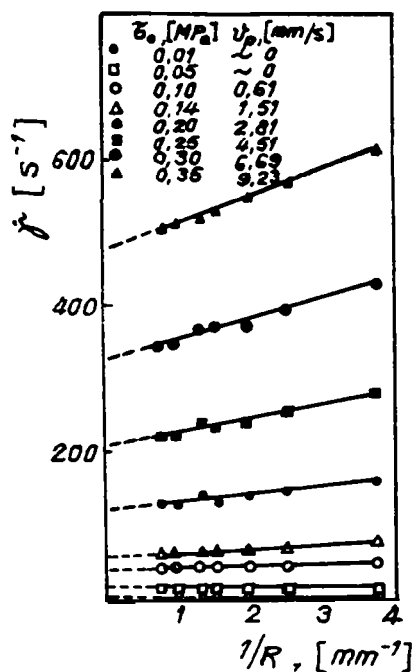


Figura 1.23 Viteza de alunecare la perete (Ramamurthy [99])

Figura 1.24 Viteza de alunecare la perete determinată prin tehnica de măsurare Mooney în zona I (a) și zona II (b) de curgere, (Lupton [76])

În baza unor cercetări mai recente, Hatzikiriakos și Dealy [60] propun o lege de alunecare la perete care ține seama nu numai de efectul tensiunii de forfecare, presiune și temperatura, ci și de caracteristicile moleculare (masă moleculară medie și polidispersie) a materialului studiat, polietilena cu  $M_w = 56+178$  kg/mol. Astfel, pe baza teoriei lui Eyring privind contactul polimer – perete cei doi cercetători propun un model de interpretare a rezultatelor care descrie o tranziție între starea de contact adeziv și alunecarea topiturii la perete potrivit căruia efectul adeziv este o funcție de solicitarea critică și de tensiunea de suprafață a materialului procesat, figura 1.25.

Atwood și Schowalter [7] stabilesc o dependență liniară între viteza de alunecare și tensiunea de forfecare:

$$V_g = D \cdot (\tau_w - \tau_c), \quad D = \text{coeficient de proporționalitate } (2,02 \cdot 10^{-5} \text{ m/Pa}\cdot\text{s}); \quad (1.101)$$

$\tau_w$  = tensiunea de forfecare la perete;

$\tau_c$  = tensiunea de forfecare critică ( $3,76 \cdot 10^5$  Pa).

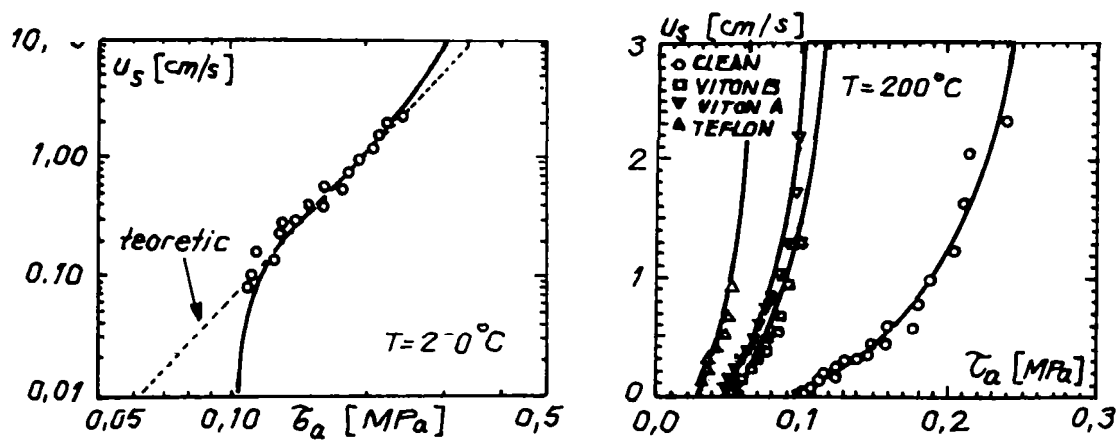


Figura 1.25 Viteza de alunecare functie de tensiunea de forfecare  
Rezultate experimentale pentru PEJDL, Hatzikiriakos [60]

Faptul că frecvența caracteristică a analizei Fourier (FTIR) a produselor rezultate este aceeași cu cea a produselor cu defecte de extrudare, validează această relație pentru zona II de curgere.

În baza rezultatelor experimentale obținute pentru elastomeri, El Kissi și Piau [47] propun, pentru relația tensiune de forfecare – viteza de alunecare la perete, o lege empirică ce ține cont de 6 parametrii ( $\tau_{crit}$ , A, B,  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $u_1$ ) definiți de condițiile de experimentare:

$$\tau_r = \tau_{crit} - A \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot W_g)] - B \cdot [\exp(-\alpha \cdot u_1^2) - \exp(-\alpha \cdot (W_g - u_1)^2)], \quad (1.102)$$

și care exprimă o evoluție continuă în zona I de curgere urmată de o dependentă de gradient descrescător, "curba de tip clopot", figura 1.22a, manifestată în zona de curgere instabilă ce separă zonele I și II.

Diversitatea mecanismelor și teoriilor existente privind instabilitatea curgerii materialelor polimerice topite se datorează tehnicilor de măsurare limitate ca posibilități, deci dificultăților întâmpinate în prelevarea de date precise privind valorile vitezei, presiunii, temperaturii și descrierea distribuției acestor variabile în secțiunea de curgere. Nici unul dintre aceste mecanisme sau modele teoretice nu explică, independent de celelalte, comportarea reologică reală a fluidului pseudoplastic de multe ori concluziile lor fiind în totalitate sau parțial contradictorii.

Ca o concluzie generală este demn de remarcat acceptarea manifestării unui fenomen de "fractura coezivă" ("melt fracture" sau "fracture cohésive") la o anumită distanță de perete care definește grosimea "pielii extrudatului," zonă a secțiunii transversale caracterizată de adeziunea la perete (Bennalal, [19]).



De asemenea, majoritatea cercetătorilor în domeniu sunt de acord cu existența deplasării fluidului în vecinătatea peretelui după o schemă alternativă alunecare-adeziune (stick-slip) cu viteză de valoare mică și neglijabilă în raport cu viteza medie de curgere care nu generează defecte de extrudare în zona I de curgere. Pentru zona II de curgere fluctuațiile de viteză sunt importante, atât spațiale cât și temporale și induc apariția defectelor produsului extrudării.

Este acceptat faptul ca discontinuitatea curbelor de curgere și declansarea fenomenului de alunecare la perete ar putea fi rezultatul (Durand, [43]):

- unei modificări a condițiilor la limită pentru anumite regimuri de curgere în care tensiunea de forfecare impusă, în sinergie cu alți parametri fizici (a-i topiturii) și topologici (a-i filierei), are un rol hotărâtor;
- unei proprietăți intrinseci a polimerului (lege de comportament non-monotona, modificarea globala a orientării macromoleculor). Autorii unor astfel de ipoteze nu exclud posibilitatea alunecării la perete dar atribuie schimbările de comportament reologic, în exclusivitate, caracteristicilor intrinseci ale fluidului .

De remarcat faptul că în lucrările lor, Bubsby și Mac Sporrán [26] apreciază că variații oscilante ale vitezei de curgere a topiturii sunt inerente, chiar dacă nu sunt asociate întotdeauna defectelor de extrudare, și sunt determinate de natura vâsco-elastică a fluidului fiind definite ca " oscilații de relaxare" determinând evoluția sistemului după un ciclu de histerezis.

### Concluzii :

A. Indiferent de metoda de investigare, experiențele de velocimetrie asupra masei topiturii sunt deficitare în privința determinării precise a vitezei de deplasare în imediata vecinătate a peretelui dar permit definirea a trei mecanisme posibile de curgere (Durand [43]), figura 1.26:

- cu contact adeziv la perete,  $v_p = 0$ ;
- cu strat fin lubrifiant la perete,  $v_p = 0$ ,  $v_e > 0$ ,  $\eta_1 < \eta_2$ ;
- cu alunecare la perete,  $v_p \neq 0$ .

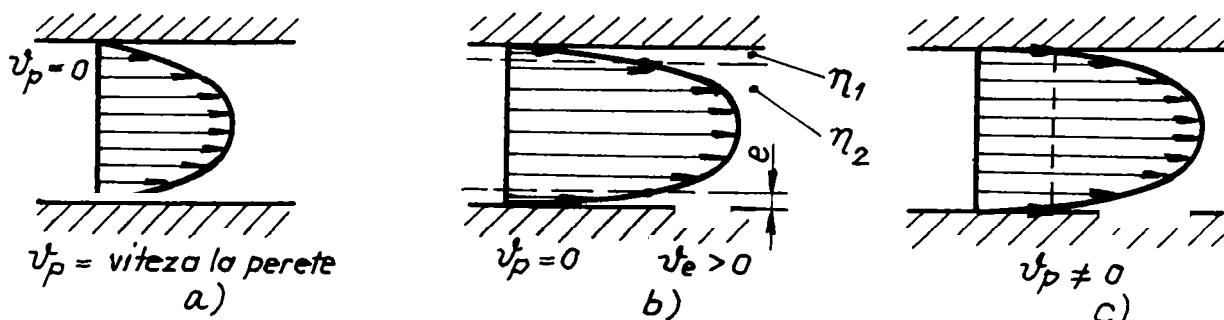


Figura 1.26 Distribuții de viteză pentru diferite mecanisme de curgere

B. Rezultatele experimentale confirmă ipoteza potrivit căreia există (Durand, [43]):

- un interval de valori ale debitului extrudat pentru care presiunea este instabilă manifestând variații periodice între două valori limită (min/max);
- un interval de valori ale presiunii în care fiecărei valori de presiune  $i$  se pot asocia două valori de debit extrudat, situate în zona I, respectiv în zona II a curbelor de curgere.

#### 1.4.2. Influența proprietăților suprafeței active a dispozitivului de punere în formă asupra vâscozității aparente

Benallal în cercetările sale asupra efectului de suprafață a utilizat un reometru rotativ plan-plan, parametrul geometric variabil fiind distanța dintre cele două plane, unul fix iar celălalt în mișcare de rotație cu o componentă sinusoidală, figura 1.27, astfel încât partea superioară a eșantionului de studiat este supusă unei deformării unghiulare

$$\alpha^* = \alpha_0 \cdot e^{j\omega t}, \quad (1.103)$$

care dă deformarea de forfecare sinusoidală  $\varepsilon^*(\omega)$  ce induce tensiunea de forfecare  $\tau^*(\omega)$  astfel

$$\text{încât } G^*(\omega) = \frac{\tau^*(\omega)}{\varepsilon^*(\omega)} = G'(\omega) + j \cdot G''(\omega), \quad (1.104)$$

modulul aparent  $G^*(\omega)$  fiind transformata Fourier a funcției de relaxare transversală  $G_t$  a materialului care descrie comportarea fluidului în domeniul solicitărilor frecvențiale.

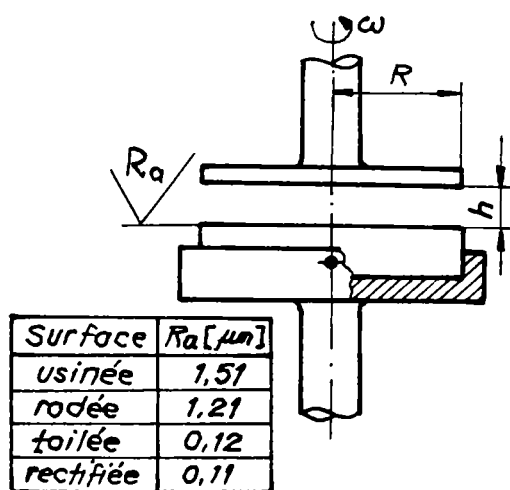


Figura 1.27 Reometru rotativ plan-plan

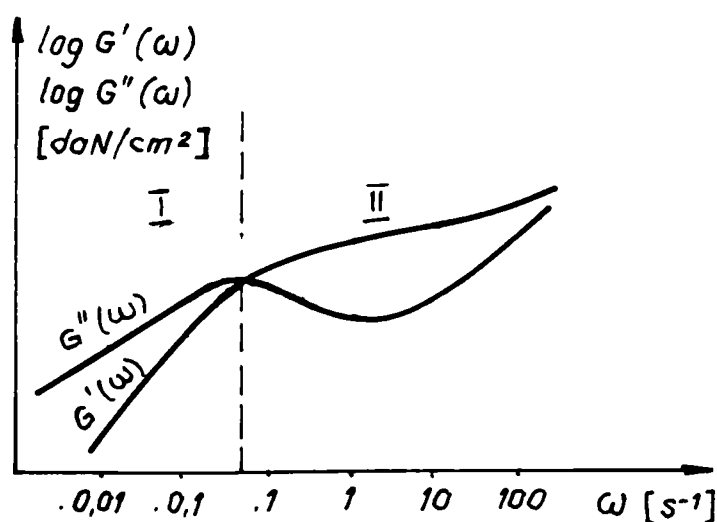


Figura 1.28 Reprezentarea grafică a componentelor modulului aparent  $G^*$  funcție de  $\omega$ , (Benallal [19])

Vâscozitatea complexă a materialului va fi deci :  $\eta^*(\omega) = \frac{G^*(\omega)}{j \cdot \omega} = \eta'(\omega) - j \cdot \eta''(\omega)$

iar vâscozitatea limită  $\eta_0$  va fi dată de  $\eta_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} \eta^*(\omega)$ , (1.105), (1.106)

Gradientul de viteza de forfecare a fost menținut la valori constante :

$\omega < 1 / \tau_0$  unde  $\omega =$  viteza unghiulară (pulsatia) impusă ;  
 și  $\tau_0 =$  timpul de relaxare a segmentului macromolecular mobilizat ca  
 $\alpha_0 \cdot R / h = const$  funcție de tensiunea de forfecare în vecinătatea peretelui ;  
 $\alpha_0 =$  deformația unghiulară impusă platoului superior ;  
 $h =$  distanța dintre discurile reometrului ;  
 $R =$  raza discului reometrului.

solicitare ce induce asupra platoului inferior, prin intermediul materialului de studiat, un cuplu  $M$ , măsurabil, a cărui valoare este funcție de condițiile de măsurare și proprietățile intrinseci ale materialului studiat manifestate în condițiile particularizate ale studiului. Construcția reometrului permite montarea în platoul inferior a mai multor discuri cu rugozități ale suprafeței active cuprinse între  $R_a = 0,11 \div 1,51 \mu m$ .

Variind distanța dintre discurile reometrului se constată că modulele aparente  $G^*(\omega)$  sunt funcții  $G^*(\omega) = f(h, R_a, \omega, T)$  ceea ce a permis identificarea unui "efect de geometrie" în reometrie, dependentă  $G^* = f(h)$ , efect ce ține seama de comportarea cinematică a macromoleculor întrepătrunse, din pelota statistică, în vecinătatea interfeței solid-fluid.

Reprezentarea grafică a componentelor reale,  $G'(\omega)$ , și complexe,  $G''(\omega)$ , a modulului aparent  $G^*$ , figura 1.28, pune în evidență tendința de convergență spre aceeași valoare a celor două componente, pentru viteze unghiulare mari ( $\omega \gg 100 \text{ rad/s}$ ) și existența celor două zone de comportare reologica ale topiturii, figurile 1.18 ÷ 1.22 :

- zona I – caracterizată de mișcări de ansamblu ale macromoleculei, corespunzătoare propagării fenomenului de relaxare a acesteia din aproape în aproape ; punctele de contact între macromolecule nu sunt permanente  
 $\omega \cdot \tau_0 < 1$ ,  $\tau_0 =$  timpul de relaxare a segmentului macromolecular mobilizat.
- zona II – caracterizată de deplasări parțiale ale lanțului macromolecular, pentru  $\omega \cdot \tau_0 > 1$ . Materialul se comportă ca un elastomer, macromoleculele având mai multe puncte de contact fixe.

Din analiza reprezentării grafice a componentelor modulului aparent  $G^*(\omega)$  în funcție de întreferul "h" și rugozitatea suprafeței "R<sub>a</sub>", figura 1.29, se constată stabilizarea valorilor

gradientului de viteze de forfecare  $G^*$  pentru intrefere  $h > 0,5$  mm, concluzie ce prezintă importanță practică pentru proiectarea programului experimental ( $h = 0,5 + 3,5$  mm).

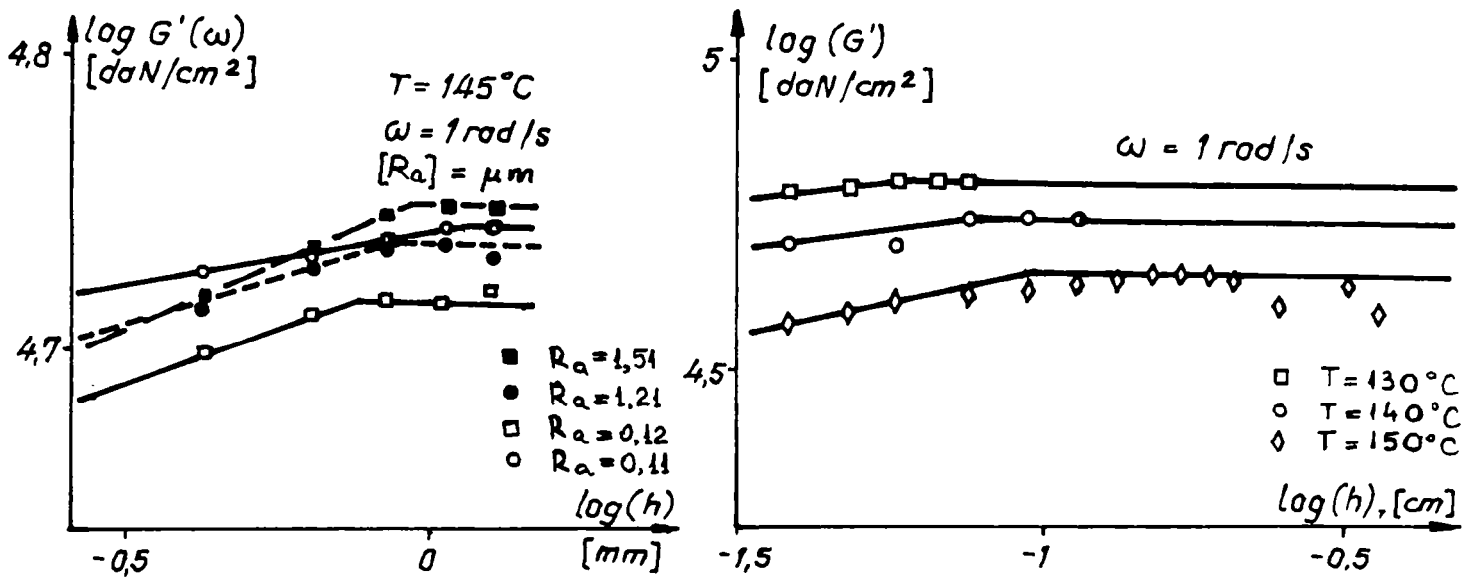


Figura 1.29 Modulul aparent  $G^*(\omega)$  în funcție de intrefereul "h", rugozitatea suprafeței "Ra" și temperatura materialului studiat, (Benallal [19])

În 1986 Ramamurthy [99], [100] a studiat efectul materialelor fluorurate asupra proprietăților de extrudare a unui polimer ce conține un aditiv fluorurat. Rezultatul studiilor a pus în evidență faptul că materialul fluorurat întârzie apariția defectelor de extrudare.

De Smet și Nam [37] completează aceste studii experimentale și demonstrează că aditivul fluorurat migrează spre perete în vecinătatea căruia formează un strat fin ce are calități lubrifiante.

Astfel, eliminarea defectelor de extrudare, asociate scăderii vâscozității aparente a polimerului procesat, este posibilă datorită declanșării fenomenului de alunecare a masei topite care nu mai are contact direct cu peretele fiind eliminată influența rugozității peretelui.

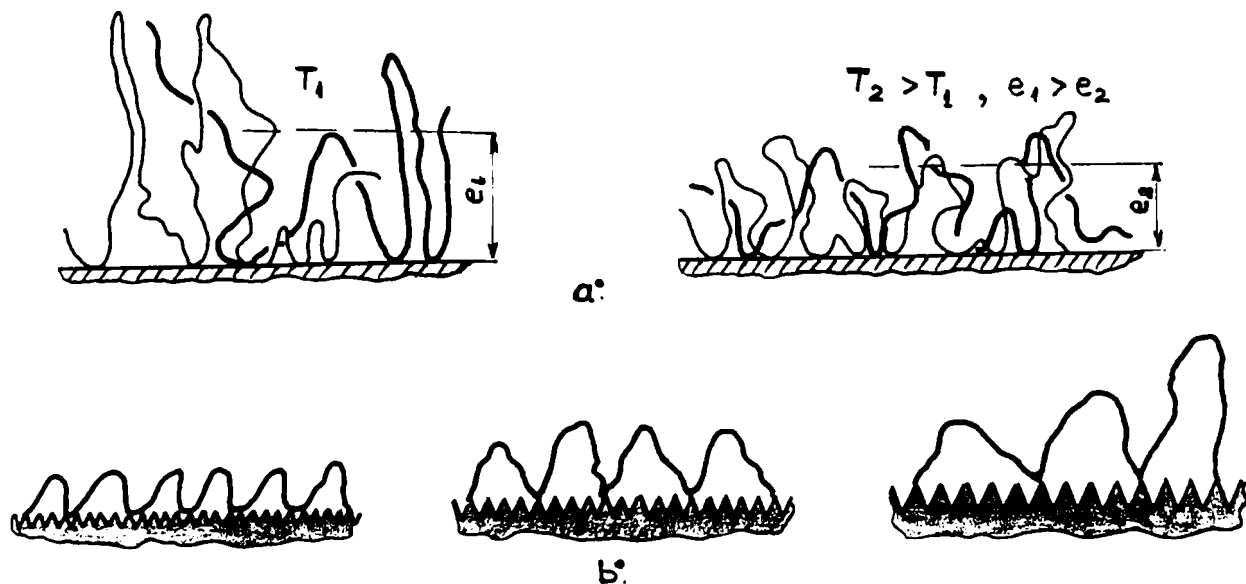


Figura 1.30 Influența temperaturii și a rugozității asupra configurației spațiale a macromoleculor în vecinătatea peretelui de curgere, (Benallal [19])

După cum a constatat Benallal [19], configurația spațială a macromoleculor în vecinătatea peretelui de curgere și grosimea acestei zone pe care a denumit-o "piele" sunt funcție nu numai de temperatura topiturii, figura 1.30a, ci și de rugozitate (adâncimea asperităților suprafeței de curgere) a cărei majorare determină scăderea numărului de contacte ale unui lanț macromolecular cu suprafața de curgere, figura 1.30b.

Recent, în studiile sale, El Kissi [47] pentru a pune în evidență influența proprietăților suprafeței de curgere asupra defectelor de extrudare utilizează o filiera de cristal pe a cărei suprafață de curgere a fost grefat, în strat fin, triclorosilan fluorat pentru a modifica natura materialului peretelui în condițiile conservării rugozității suprafeței. Ca rezultat se constată apariția primelor neregularități ale suprafeței extrudatului începând de la un debit de două ori mai mare decât la procesarea materialului în aceleași condiții de regim dar într-o filiera de cristal, și la un debit de 3.5 ori mai mare față de cazul prelucrării în filiera de oțel, figura 1.31.

Creșterile de debit, de 12-20 %, prezentate în tabelul 1.9 reprezintă efectul cumulat al naturii materialului peretelui (care are o energie de suprafață mai scăzută) și al modificării rugozității suprafeței de curgere (pentru filiera de cristal rugozitatea suprafeței active este mult mai mică decât în cazul filierei de oțel).

De remarcat însă faptul că proprietățile reologice ale topiturii sunt de nemodificat pentru o dinamică lentă a curgerii.

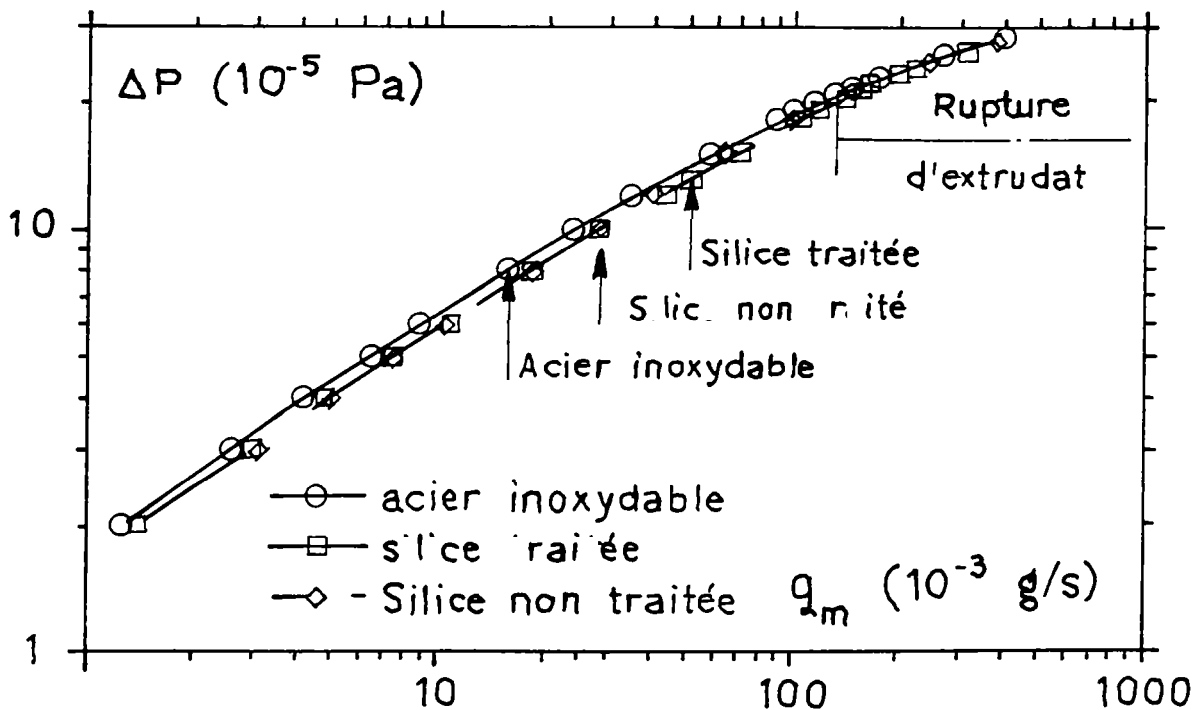


Figura 1.31 Curbe de curgere la extrudarea PE prin filiere de aceeași geometrie și materiale diferite, (El Kissi [47])

filieră bidimensională lung. spațiu tehnologic = 45 mm lățime = 20 mm întrefier = 1.8 mm		Presiune [bari]		
		8	15	21
		Debit specific $q$ [gram/s] $\times 10^3$		
filieră	oțel inoxidabil	15,9	57,6	132
	sticlă fluorurată	18,2	70,8	166
Creșterea de debit, $q$ [%]		12,6	18,6	20,5

### 1.4.3. Efectul cotei de gabarit a secțiunii de curgere (întrefier) asupra proprietăților reologice ale topiturii

Variația părții reale a modului aparent  $G^*$  cu temperatura denotă grade diferite de mobilitate ale macromoleculii funcție de valoarea temperaturii acesteia ceea ce este expresia modificării energiei de activare pe măsura ce materialul este încălzit.

Pentru EMAG la temperatura  $T = 140^\circ\text{C}$ , și întrefier  $h = 0,2$  mm, caz în care efectul de suprafață are o pondere importantă, s-a determinat valoarea energiei de activare  $E_a = 20$  kcal.

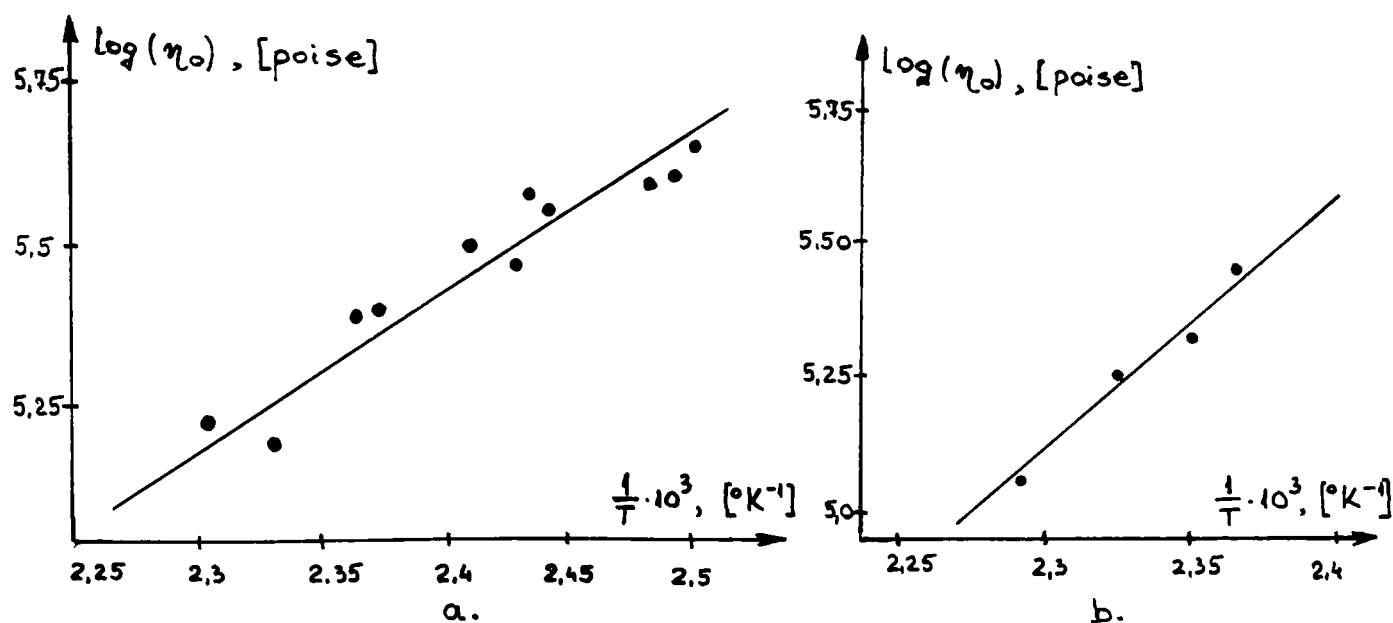


Figura 1.32 Variația vâscozității limită determinată cu reometru rotativ, pentru EMAG (pentru întrefier  $h=0,8$  mm, (a), și  $h=0,2$  mm (b)), (Benallal [19])

Pentru  $h = 0,8$  mm, când efectul de suprafață este neglijabil în ceea ce privește comportarea reologică a topiturii, s-a determinat  $E_a = 13$  kcal, valoare mult diminuată dar care nu se modifică cu majorarea, în continuare, a întrefierului ceea ce susține ipoteza unui gradient de

proprietăți în vecinătatea peretelui și faptul că zona influențată de contactul fluidului cu peretele are extinderea  $e < 0,8$  mm (dimensiune măsurată după normala la suprafață), figura 1.32.

În soluționarea problemelor de dinamică moleculară tendința actuală este de a ține seama de efectul propagării tensionării unei molecule asupra lanțurilor moleculare învecinate a.î. orice restricție de mobilitate a macromoleculilor (temperatură, ramificare, reticulare, grad de întrepătrundere, puncte fixe de contact) influențează vâscozitatea.

De Gennes constată manifestarea fenomenului de alunecare la perete în zona I de curgere, și propune pentru viteza de alunecare o lege de variație liniară, proporțională cu sollicitarea,

figura 1.33a : 
$$\tau = \eta_0 \cdot \left( \frac{dv}{dz} \right)_r = K \cdot v_0, \quad (v_0 = \text{viteza de alunecare la perete}), \quad (1.107)$$

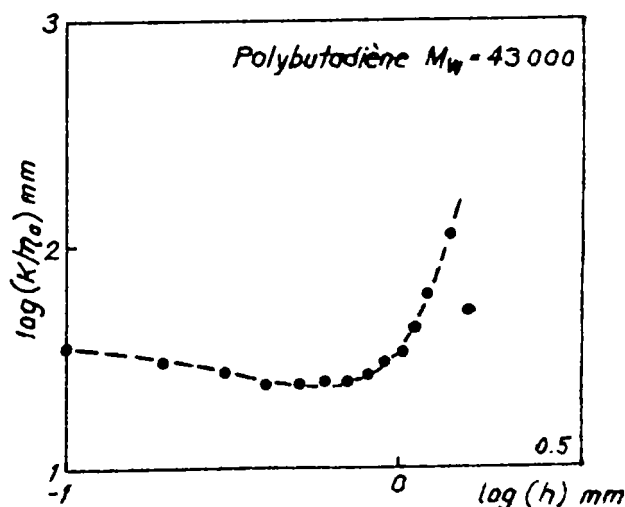
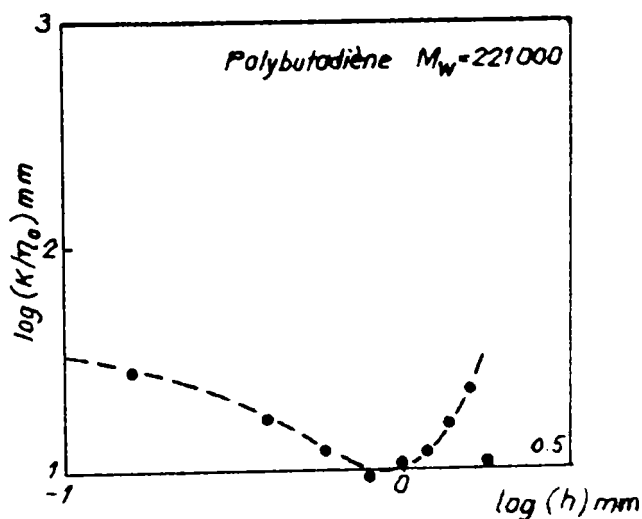
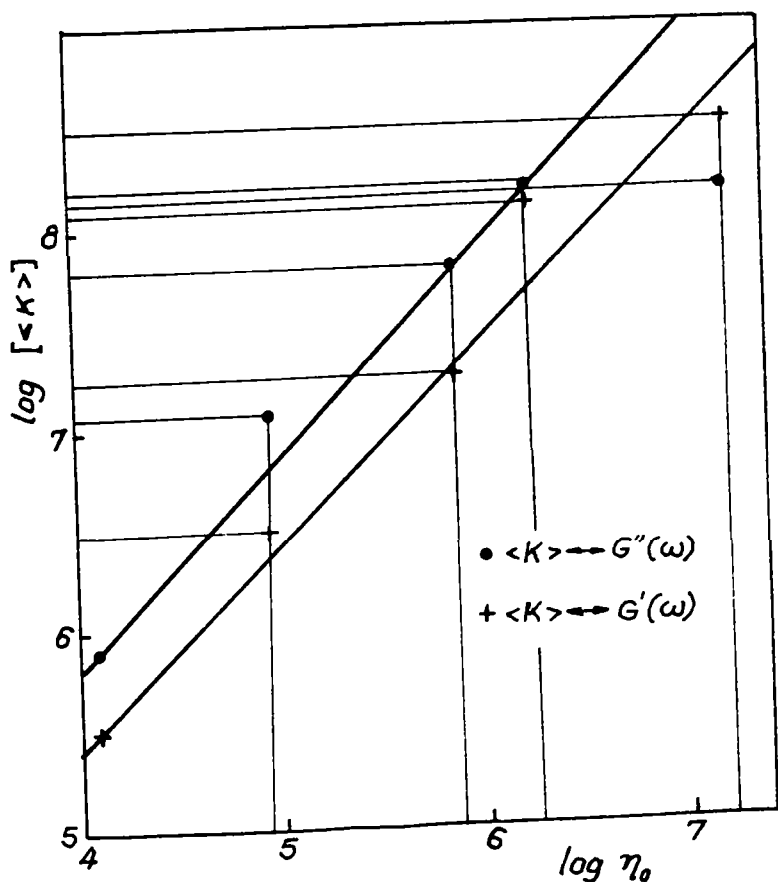


Figura 1.33 Variația vâscozității funcție de coeficientul de proporționalitate K pentru polibutadiena în soluție, la 21° C, (Benallal [19])

Studiile experimentale efectuate de Benallal verifică aceasta lege și demonstrează necesitatea considerării factorului de proporționalitate K ca fiind variabil în raport cu întreferul  $h$  și natura materialului supus studiului și pun în evidență existența, independent de natura

materialului, a unui interval restrâns de valori critice ale înțreferului,  $h_c = 0,5+1$  mm, figura 1.33b

Importante pentru proiectarea studiilor experimentale pe care le-am efectuat sunt două dintre concluziile acestui autor :

- validează ipoteza unor valori critice ale înțreferului dependente de natura materialului studiat în limite restrânse și propune o formula de calcul pentru determinarea acestei mărimi :  $h_c \approx N^{0,83}$  mm. Conform reprezentărilor grafice din figura 1.33b, se înregistrează modificări importante ale comportării reologice ale fluidului studiat pentru  $\log(h) = 0$ , ( $h \approx 1$  mm).
- susține modelul dinamic de curgere în straturi de proprietăți reologice diferite – figura 1.26, asimilat comportării pelotei statistice considerate ca un volum de material ce prezintă un gradient de proprietăți ce variază în raport direct cu distanța de la perete, figura 1.34.

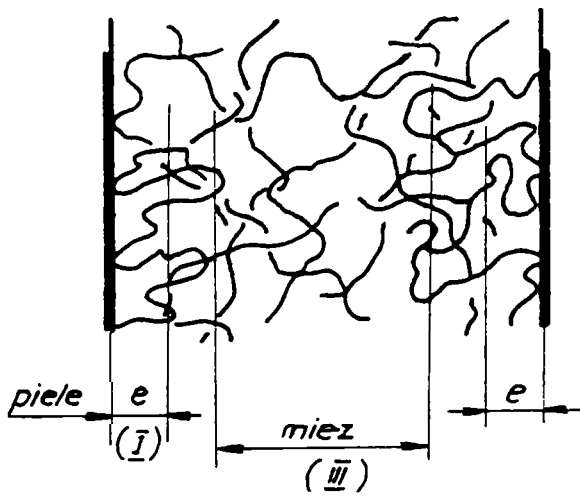


Figura 1.34 Model teoretic pentru curgerea multistrat în vecinătatea peretelui

Primul strat –I, pielea- de grosime "e" corespunde zonei de topitura în care lanțurile moleculare sunt grefate sau absorbite (lipite) de suprafața peretelui. În această secțiune de curgere constrângerile de mobilitate sunt puternic manifestate a.î. vâscozitatea este foarte mare și viteza de deplasare a topiturii este aproape nulă ( $v = v_0$ ) fiind zero la perete și creștând în mod exponențial spre centru. Distribuția de proprietăți în zona de macromoleculor în pelota statistică.

Al treilea strat –III, miezul – este zona de secțiune transversală care prezintă cel mai ridicat grad de orientare a lanțurilor moleculare ca urmare a curgerii și se poate considera că este caracteristică transferului de material prin secțiune infinită.

Zona II, de disipare a perturbațiilor macromoleculor, este o zonă de tranziție în care se manifestă efectul cooperativ al restricțiilor de mobilitate menționate anterior.

Modelul de dinamică macromoleculară, cu valabilitate în toate cele trei zone, poate fi cel propus de Doi și Edwards, de "regenerare a tubului macromolecular" (renouvellement du tube).

Potrivit acestui concept, un lant macromolecular cu P segmente de lungime N-a dintre care unele sunt mobile ( $T > T_v$ ), scos din poziția de echilibru energetic printr-o solicitare



mecanica exterioara, poate ocupa o poziție de energie minimală în timpul de relaxare  $t_r(\phi)$

dedus din relația :

$$\frac{1}{t_r(\phi)} = \frac{\phi}{t_{rN}(N)} + \frac{1-\phi}{t_{rP}(N)}, \quad (1.108)$$

unde  $\phi$  = ponderea segmentelor mobilizate N din lanțul primitiv P ;

unde :  $t_{rN}(N) \approx \frac{t_r(N)}{N} \cdot N^2$ , este timpul de relaxare a segmentului N-a ,  
contact segment mobil – segment mobil ;

si  $t_{rP}(N) \approx \frac{t_r(P)}{P} \cdot N^2$ , este timpul de relaxare a macromoleculii P-N prin posibila  
modificare a poziției punctelor de contact segment mobil –  
segment fix în interiorul unui tub molecular imaginar, figura 1.35.

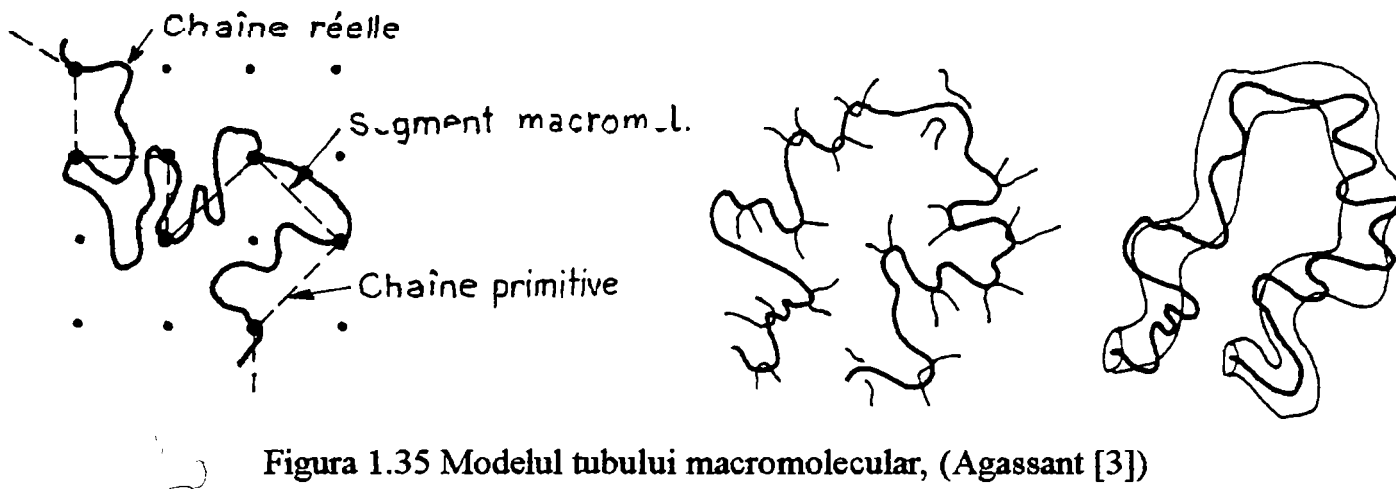


Figura 1.35 Modelul tubului macromolecular, (Agassant [3])

Considerând că în stratul I, pielea, macromoleculile au un capăt fixat pe suprafața peretelui Benallal propune pentru calculul grosimii acestui strat formula :

$$e = \frac{a \cdot \sqrt{N}}{3}, \text{ grosime de ordinul de mărime al razei de girație,} \quad (1.109)$$

$$\text{și } K = \exp\left(0,6 \cdot \frac{\sqrt{N}}{3}\right), \quad (1.110)$$

relații în care  $a$  = lungimea segmentului elementar al macromoleculii.

Rezultatele experimentale ale acestui autor demonstrează că pe măsură ce temperatura crește grosimea pielii se diminuează și vâscozitatea scade ( $\eta = f(K)$ , tabel 1.10).

Tabel 1.10

Temperatura, [°C]	EMAG		EMAG + PA 12	
	K	B	K	B
131	12,78	0,24	20,00	0,38
140	7,19	0,2	12,30	0,40
150	6,30	0,1	2,70	0,08
160	2,70	0,08	-	-

#### 1.4.4. Efectul presiunii asupra vâscozității aparente

In majoritatea lucrărilor consacrate studiului curgerii polimerilor, ipoteza simplificatoare a fluidului incompresibil este admisa datorita:

- simplității interpretării modelului matematic;
- lipsei de rezultate experimentale privind modificările comportamentale de curgere funcție de presiune.

In ceea ce privește efectul presiunii asupra vâscozității aparente, Spencer, [111], a constatat rolul important pe care îl joaca compresibilitatea polimerilor în stare topită. Conform studiilor cercetătorilor Maxwell [80] și Westover [129], vâscozitatea polietilenei este multiplicată cu un factor ce ia valoare până la 5 iar cea a polistirenului cu factorul 135 când presiunea topiturii ia valori între 350 și 1500 de bari, ceea ce contravine ipotezei potrivit căreia polimerii în stare topită sunt incompresibili.

Conform studiilor lui Metzger și Hamilton [84], rezultatele determinării gradientul de viteză de forfecare prin măsurarea greutateii extrudatului sunt comparabile cu cele obținute prin luarea în considerare a deplasării pistonului. Aceste considerații diminueaza rolul compresibilității topiturii (ca efect al presiunii) în determinările experimentale dar pentru extrapolarea rezultatelor se ține seama de nelinearitatea curbei presiune-vâscozitate aparentă funcție de raportul  $L/D$  al filierei, pentru valori mari ale presiunii (curba Bagley).

Efectul presiunii asupra vâscozității aparente a polimerului plastifiat se manifestă prin deplasarea curbelor de vâscozitate aparentă ca funcții de gradientul de viteza de forfecare la o temperatură dată și geometrie a filierei particularizată, figura 1.36 (Huynh [63]). Cu cât raportul  $L/D$  este mai mare și temperatura mai scăzută, cu atât efectul presiunii asupra vâscozității aparente este mai important.

Pentru același debit extrudat, influența creșterii de presiune poate fi comparată cu efectul diminuării de temperatura sau mai degrabă cu diminuarea diferenței între temperatura efectivă a polimerului și temperatura de tranziție vitrosă. Se explică astfel sensibilitatea ce o prezintă polimerii a căror temperatură de tranziție vitrosă este ridicată la variația presiunii pentru temperaturi uzuale de transformare.

Astfel, curbele de curgere pun în evidență:

- un domeniu liniar, corespunzător unui comportament newtonian, pentru valori reduse ale gradientului de viteza de forfecare. Funcția vâscozitate aparentă care este

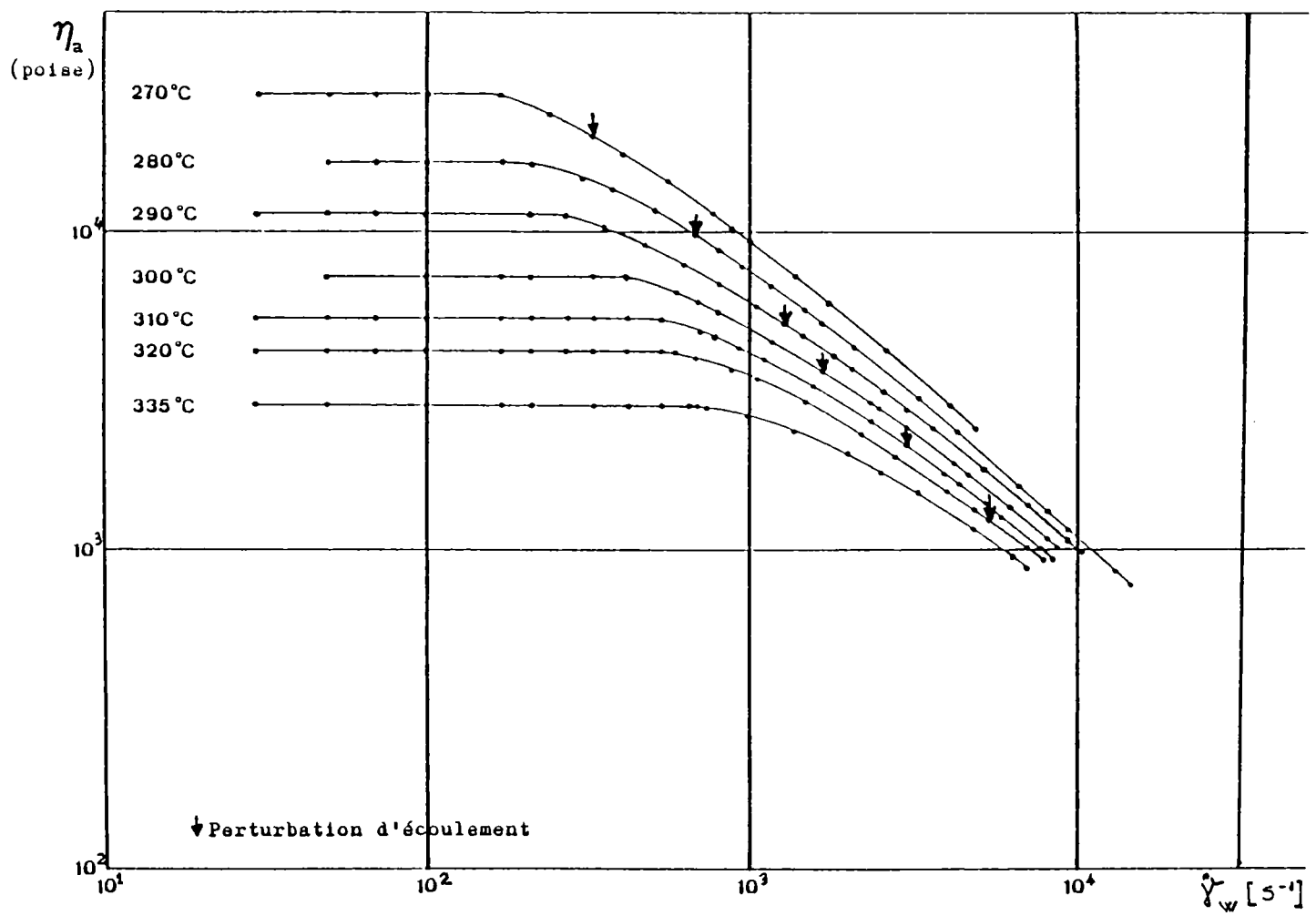
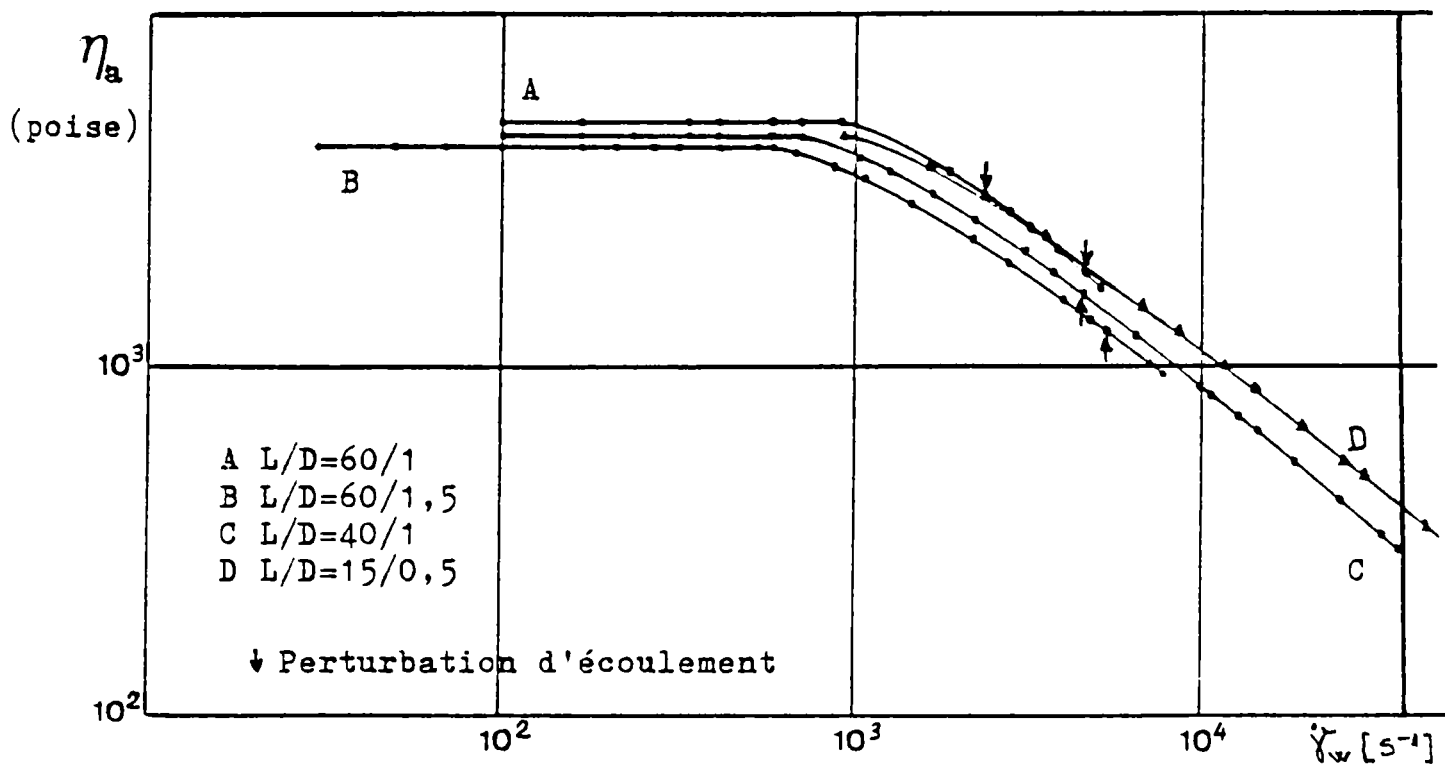


Figura 1.36 Variația vâscozității aparente funcție de gradientul vitezei de forfecare, geometria filierei și temperatura topirii, (Huynh [63])

constanta, independentă de gradientului de viteza de forfecare și tensiunea de forfecare, definește vâscozitatea newtoniană  $\eta_0$ ;

- un domeniu neliniar, corespunzător unui comportament nenevtonian de tip pseudoplastic, în care vâscozitate aparentă înregistrează scăderi constante pentru valori crescătoare ale gradientului de viteza de forfecare. În această zonă, relația dintre temperatură, efortul de forfecare și gradientul de viteza este de forma

$$f(\tau_w, \dot{\gamma}_w, 1/T)_{p=ct} = 0, \quad (1.111)$$

- convergența funcțiilor  $\eta(\dot{\gamma})$  pentru gradienti de viteza de forfecare de valoare ridicată.

#### 1.4.5. Influența temperaturii asupra vâscozității aparente

Influența temperaturii asupra vâscozității aparente este dată de modificarea energiei de activare cu temperatura, capitolul 1.3.4. Eyring [49] a explicat această tendință presupunând că o macromolecula ocupă în volumul topiturii o poziție de echilibru, sau de energie potențială minimală, determinată de interacțiunile ei cu macromoleculele învecinate. Când solicitarea (presiunea) aplicată permite depășirea unei bariere de potențial definite de nivelul tranziției determinate de valoarea temperaturii polimerului, Iclanzan [65], se declanșează curgerea prin mobilizarea unor segmente ale lanțului macromolecular care realizează salturi (tranziții) înspre o altă poziție de energie potențială minimală în raport cu starea de tensionare aplicată.

Cele două modalități de comportament ale topiturii de polimer prezentate în capitolul 1.1 pot fi explicate, la nivel molecular, cu ajutorul teoriei împăntrunderii lanțurilor macromoleculare, dezvoltată de Bueche [27]-[31] și Graessley [56]. Conform concluziilor formulate de acești cercetători, în volumul topiturii, fiecare lanț macromolecular prezintă o configurație geometrică statistic dezordonată. Dacă macromolecula este suficient de lungă (cazul majorității polimerilor de uz industrial procesați prin injecție sau extrudare) și punctele de contact intermolecular sunt numeroase, rezultatul este o rețea tranzitorie (pelotă statistică), de energie minimală, în care fiecare moleculă este "legată" de moleculele învecinate în anumite puncte (zone) și deplasarea ei nu se poate face independent, fără a afecta starea energetică a acestora.

La aplicarea unei tensiuni de forfecare, macromoleculele au tendința de a ieși din rețea și de a se orienta în direcția curgerii. Dacă solicitarea este lent aplicată, *mişcarea browniană* a

segmentelor mobile ale macromoleculii poate anula efectul de orientare astfel încât vâscozitatea aparentă a topiturii rămâne constantă,  $\eta(\dot{\gamma}) = \text{constant}$ , curgerea înscriindu-se în *zona de curgere newtoniana*. Dacă viteza de deformare (solicitarea aplicată) crește, macromoleculile se orientează din ce în ce mai mult în direcția curgerii datorită faptului că segmentelor de lant macromolecular nu li se oferă libertatea de a se retrage spre poziții de energie minimală și de a realiza relaxarea. Trebuie remarcat că în acest caz:

- energia de activare crește dar majorarea temperaturii poate crește mobilitatea segmentelor lantului polimeric fapt care ar putea permite descărcarea tensionării suplimentare prin facilitarea retragerii lor spre poziții de energie minimală;

multe macromoleculile sunt "întinse", reușesc să "iasă" (să se retragă) din pelota statistică și se orientează în direcția curgerii. Aceasta duce la scăderea densității de interpătrundere și la scăderea vâscozității aparente prin reducerea numărului *punctelor de legatura* cu moleculele învecinate, deci prin creșterea independenței de mișcare a moleculei.

#### 1.4.6. Influența compresibilității topiturii asupra comportarii reologice

Compresibilitatea topiturii de polimer nu poate fi considerată ca o cauza a comportamentului de tip PEJD deoarece coeficientul de compresibilitate  $\chi$  are același ordin de mărime pentru toate polietilenele, cu diferite grade de ramificare:

$$\chi = - (1 / V_s) \cdot (dV_s / dp), \quad \text{cu } V_s = \text{volumul specific la presiunea "p"}, \quad (\text{Durand [43]}); \quad (1.112)$$

$$0,6 \div 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1} \text{ pentru presiuni între } 0 \text{ și } 800 \cdot 10^5 \text{ Pa}, \quad (\text{Weill [128]});$$

$$1,67 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}, \quad (\text{Okubo și Hori [94]});$$

$$0,99 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}, \quad (\text{Hatzikiriakos și Dealy [58]}).$$

Acest coeficient nu este modificat de variații de masă sau de distribuție moleculară, parametrii care pot genera instabilitatea curgerii, dar intervine în manifestarea instabilității prin determinarea vitezei de parcurgere a ciclului de histerezis, figura 1.19.

Conform concluziilor lui Weill [128], capacitatea PEJD de a se comprima este o condiție necesară dar nu și suficientă pentru manifestarea defectelor de curgere, Durand [43]

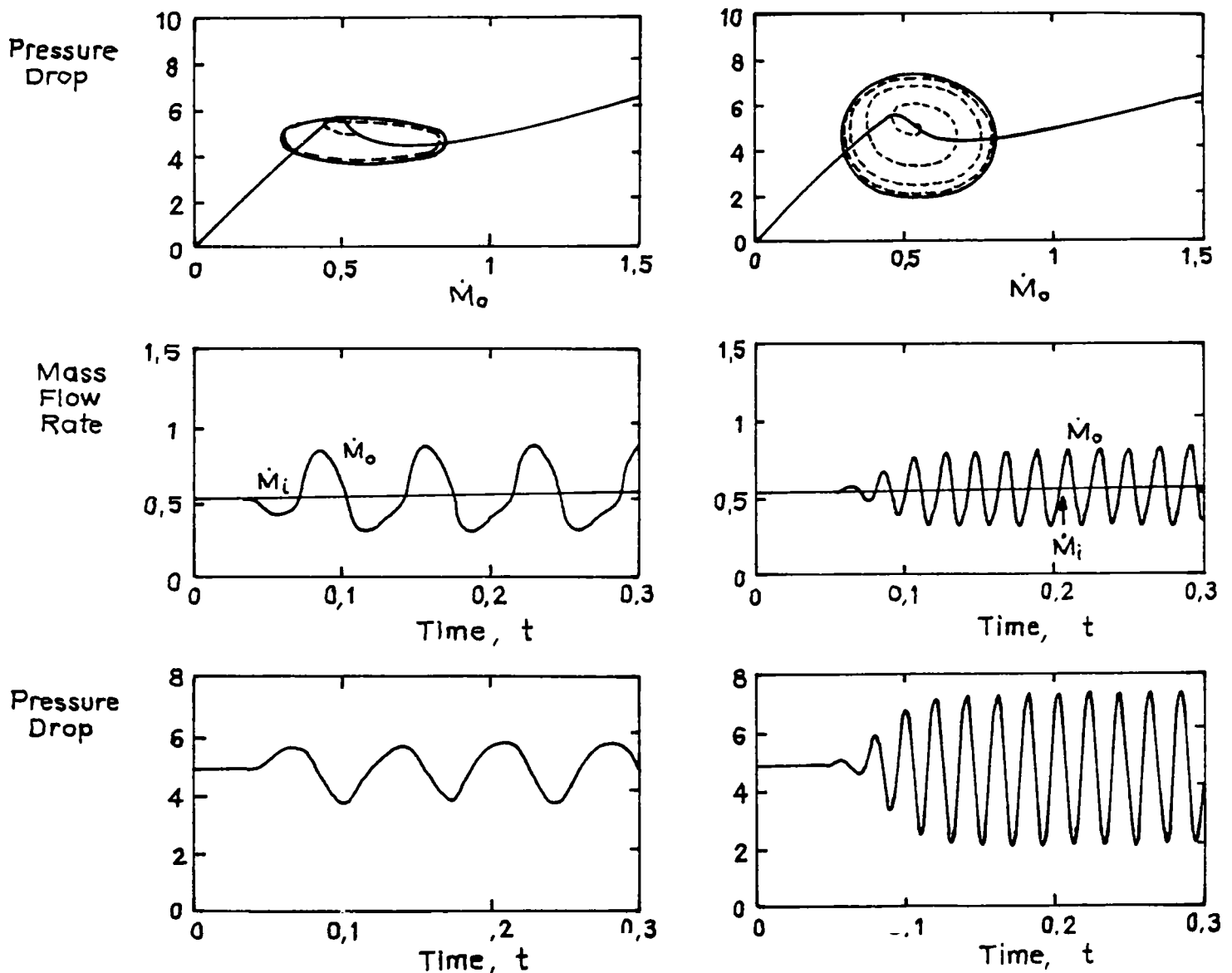
Hatzikiriakos și Dealy [59] au elaborat un model matematic în care s-a luat în considerare coeficientul de compresibilitate sub forma unei exponențiale de ordin întâi:

$$\rho(p) = \rho_{\text{atm}} \cdot (1 + \chi \cdot p), \quad (1.113)$$

Un model teoretic ce ține seama de compresibilitatea topiturii și a permis modelarea fenomenului de alunecare-adeziune ("stick-slip") a fost dezvoltat luând în considerare relația:

$$\sigma_w = \alpha_1 \cdot \left( 1 + \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_3 \cdot v_w^2} \right) \cdot v_w, \quad (1.114)$$

care este o extindere a ecuației ce descrie variația tensiunii de forfecare pentru fluide Phan-Thien-Tanner și pune în evidență un comportament instabil pentru fluide newtoniene, compresibile, ce curg printr-o rețea de capilare. Potrivit acestei legi alunecarea poate apărea dacă se depășește o valoare critică a tensiunii de forfecare, situație ce are drept rezultat instabilitatea regimului de curgere prin variații neliniare, oscilatorii, ale debitului sau ale vitezei instantanee de curgere conform ecuației (1.115)



Transient solution for  $B = 0,001$  and  $Re = 0,01$

Transient solution for  $B = 0,0001$  and  $Re = 0,01$

Figura 1.37 Variația debitului și a presiunii la ieșirea din filiera de extrudare. Modelare numerică pentru materiale compresibile, (Giorgiou și Crocket [54])

Simularea prin tehnici de prelucrare numerică, cum ar fi metoda elementelor finite sau a

$$\text{diferențelor finite, aplicate relației } 3 \cdot (v_w - Q) = -A_1 \cdot \left( 1 + \frac{A_2}{1 + A_3 \cdot v_w^2} \right) \cdot v_w, \quad (1.115)$$

unde:  $Q$  = debitul,  $\sigma_w$  = tensiunea de forfecare,  $v_w$  = viteza de alunecare la perete

$$A_1 = \frac{\alpha_1 \cdot H}{\eta}, \quad \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = \text{coeficienți ce descriu proprietățile materialului}, \quad (1.116)$$

$$A_2 = \alpha_2, \quad H = \text{interstițiul de curgere}, \quad \eta = \text{densitatea M.P.}; \quad (1.117)$$

$$A_3 = \alpha_3 \cdot V^2, \quad V = \text{viteza aparenta de curgere la ieșirea din filieră}. \quad (1.118)$$

pun în evidență, figura 1.37, un regim de curgere caracterizat de variații oscilatorii ale debitului și presiunii la ieșirea din filieră. Aceste variații determină apariția defectelor de extrudare iar frecvența și amplitudinea oscilațiilor sunt influențate de compresibilitatea materialului plastifiat, B (sau  $\chi$  conform notațiilor lui Hatzikiriakos și Dealy).

Aplicând acest model pentru simularea matematica a comportarii reologice a topiturii de material polimeric s-a verificat existența unei zone de curgere instabilă și tendința evolutivă după un ciclu de histerezis a curbei de curgere, figurile 1.19, 1.21.

## 1.5. Reometre capilare

În laboratoarele de analize ale întreprinderilor de procesare a materialelor polimerice care folosesc celule flexibile de fabricație (pentru fiecare lot de material achiziționat) se determină un indice de vâscozitate aparentă, valoare ce va fi comparată cu o valoare etalon rezultată din analiza materialului pentru care s-au stabilit parametrii de reglaj a-i mașinii.

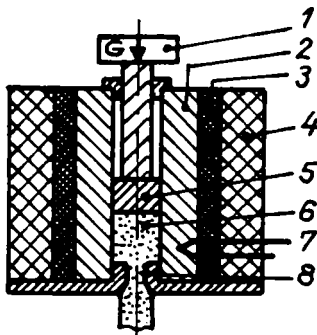
Dacă indicele de vâscozitate aparentă pentru noul material nu prezintă valori apropiate de valoarea etalon a lotului martor, pentru care s-au făcut reglajele mașinii de injectat, se pune problema modificărilor în programarea utilajelor de injectare.

Larg utilizate pentru determinarea indicelui de vâscozitate pentru materiale polimerice de uz industrial sunt "plastometrele", (Mihail, [89]):

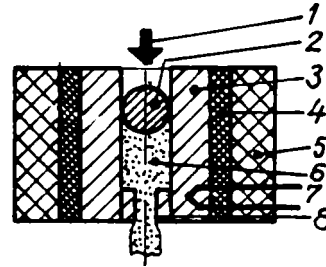
- de extrudare, figura 1.38a, cu raportul  $L/D = 4$ , temperatura topiturii de poli-etilena este  $190^\circ\text{C}$  și se considera uniformă, greutatele aplicate sunt 2.16 kg ;

- plastometru Bagley, care utilizează în locul greutateilor comprimarea gazelor, figura 1.38b; diametru duza  $D = 5 \text{ mm}$ , lungimea duzei  $L = 45 \text{ mm}$ , temperatura topiturii (PEJD) este de  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ , presiunea azotului este  $1.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .

Vâscozitatea materialului, la o temperatura prestabilită, este dată de indicele topiturii calculat cu relația  $IT = M / t$ , unde  $M$  este cantitatea de material ce a ieșit prin orificiul calibrat al plastometrului în timpul  $t$ .



1 - greutate; 2 - perete metalic;  
3 - încălzire electrică; 4 - izolație;  
5 - piston; 6 - topitură de polimer;  
7 - termocuplu; 8 - duză (capilară).



1 - azot sub presiune; 2 - bilă  
metalică; 3 - perete metalic;  
4 - încălzire electrică; 5 - izolație  
6 - topitură de polimer; 7 - termocuplu;  
8 - duză (capilară).

Figura 1.38 Plastometre a. de extrudare b. de tip Bagley

Reometrul capilar este soluția optimă pentru studiul comportamentului reologic a topiturilor de polimeri în limitele acoperitoare pentru valorile gradientului viteza de forfecare în cazul diferitelor procedee de prelucrare (punere în formă) a polimerilor, (Huynh [63]), prin:

- compresiune – injectie:  $\dot{\gamma}_w = 1 - 10 \text{ s}^{-1}$ ;
- calandrare:  $\dot{\gamma}_w = 10 - 10^2 \text{ s}^{-1}$ ;
- extrudare:  $\dot{\gamma}_w = 10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$ ;
- injectare:  $\dot{\gamma}_w \geq 10^3 \text{ s}^{-1}$ ;

În programele experimentale, secțiunile îngustate de curgere, datorită încălzirii prin disipare vâscoasă pe care o generează, pot constitui importante surse de erori ce pot să apară în utilizarea reometrelor capilare. De aceea, rezultatele în valori absolute fiind considerabil afectate de erori sistematice, este de preferat abordarea programului de studii experimentale într-o manieră comparativă.



## 1.6. Concluzii

În raționamentele dezvoltate pentru studiul teoretic privind curgerea simplă a lichidelor newtoniene, majoritatea lucrărilor de specialitate considera, ca și condiție limită, simplificatoare, ca viteza la peretele canalului de curgere este nulă deci materialul plastifiat nu aluneca pe suprafața cu care ia contact. Pentru materialele polimerice, care manifestă un comportament vâscoelastic, compresibile, viteza la interfața polimer-solid poate fi nenulă prin apariția fenomenului de alunecare. Acest efect, pus în evidență teoretic (Giorgiou și Crocket [54]), este verificat experimental (Hatzkiriakos [60], Ramamurthy [99], El Kissi și Piau [47], Durand [43]) și poate fi cauza amorsării regimului instabil de curgere și apariției defectelor de extrudare (Agassant [3]).

Deci, pentru a pune în evidență instabilitatea ce se manifestă la procesarea materialului polimeric plastifiat, este necesar a lua în considerare valori nenule pentru coeficienții de compresibilitate și de a studia fenomenologia producerii alunecării pe interfața polimer-perete care se poate manifesta ca (El Kissi și Leger [45]):

- alunecare a unui amestec omogen de polimeri dintre care unul este considerat aditiv. Aditivul, florurat, migrează spre peretele canalului de injecție și formează, în vecinătatea acestuia, un film de material florurat ce favorizează alunecarea topiturii tranzitice;
- alunecare liniară a polimerului pe perete. Se manifestă, într-o măsură mai mică sau mai mare, oricare ar fi parametrii de procesare;
- alunecarea macroscopică la perete, asimilată alunecării unui polimer solid pe alt material solid: oțel, sticlă....

În cazul curgerii topiturilor de material polimeric, este acceptată însă ipoteza vitezei de deplasare nenulă în vecinătatea peretelui ca urmare a comportamentului vâsco-elastic al acestor fluide care determină apariția fenomenului de alunecare la perete.

Teoretic, acest fenomen al alunecării la perete este consecința comportamentului vâsco-elastic al topiturii de polimer și intensitatea lui se reflectă în creșterea debitului de material extrudat; se manifestă doar în zona II de curgere, figura 1.19, 1.21, după depășirea unei stări turbulente de curgere, dar au fost semnalate studii experimentale care au pus în evidență alunecarea la perete chiar și în zona I de curgere.

Deoarece determinarea vitezei de alunecare la perete este dificilă a se realiza în mod direct, potrivit metodologiei aplicate de mulți cercetători în domeniul reologiei, studiul trebuie abordat într-o manieră indirectă, urmărind variațiile de debit extrudat cu și fără activare ultrasonică.

Este evident faptul că folosind pentru determinări repetate același vâscozimetru (de tipul celor prezentate în figura 1.38 sau modificat după cerințele experimentului) se elimină posibilele erorile aleatorii iar erorile sistematice nu influențează rezultatul final dacă acesta se bazează pe valoarea relativă a indicelui topitului  $IT_{rel}$ , valoare raportată la un indice al topitului  $IT$  al unei probe martor de polimer.

Pentru realizarea sintezei bibliografice prezentată în acest capitol au fost selectate lucrări reprezentative, ale unor cercetători consacrați în domeniul reologiei, criteriu de selecție fiind acceptarea ipotezelor emise de către autori de către comunitatea științifică (menționări bibliografice) sau confirmarea acestora prin cercetări independente.

Pe lângă aspectul informativ al acestui studiu în domeniul comportării reologice a topiturilor de polimeri trebuie menționat și caracterul practic al acestuia, multe din rezultatele experimentale și concluziile autorilor citați fiind folosite pentru definirea soluției tehnice a standului experimental și proiectarea programului de experimentare pentru studiul activării ultrasonice a curgerii topitului de polimeri.

## Injectarea și extrudarea materialelor polimerice

### 2.1. Considerații generale

Dezvoltarea sistemelor de producție - și implicit a domeniilor de activitate -, în special în ramura construcțiilor de mașini, presupune parcurgerea a trei etape succesive definite de tipul de activitate desfășurat: manufacturieră, masinistă și flexibilă.

Dezvoltarea tehnologică a unui domeniu de activitate poate fi:

- intensivă - în sensul mecanizării, automatizării și informatizării procesului, în scopul diminuării sau eliminării unor componente ale normei de timp;
- extensivă - presupune realizarea unor noi materiale și/sau sisteme tehnologice aferente în scopul îmbunătățirii performanțelor sistemelor de producție sau a calității produselor.

Dezvoltarea tehnologică extensivă poate, eventual, genera un nou domeniu de activitate. Astfel, în tehnologia mecanică, plasturgia apare ca domeniu nou ca urmare a preocupărilor pentru găsirea unor înlocuitori pentru resursele materiale clasice.

Acest domeniu de activitate nu a avut, în dezvoltarea sa, o perioadă manufacturieră. Noile materiale de sinteză - polimerii - au început să fie comercializate relativ recent ( PVC - 1927; LDPE, HDPE - 1942-1953; PP - 1957; etc) și s-au dovedit a fi, frecvent, soluția optimă pentru înlocuirea metalului, lemnului și sticlei folosite în producția de serie de tip masinist.

Utilizarea lor a necesitat, însă, elaborarea unor procedee de prelucrare specifice, de productivitate cel puțin comparabilă cu a tehnologiilor pe care le-au înlocuit, dar aplicațiile industriale, deși puternic motivate de argumente ca :

- preț de cost scăzut al materiei prime;
- productivitatea procedeelor de punere în formă;
- lipsa limitărilor în ceea ce privește complexitatea formei produsului;
- densitate mult redusă în raport cu cea a materialelor pe care le-au înlocuit;
- calitatea estetică a produsului;
- adaptabilitate aproape totală la eventualele modificări ale sistemului economic în sensul onorării cererii pieței de desfacere în condiții de eficiență și timpi de răspuns minimi.

sunt limitate de slabele proprietăți mecanice ale acestor materiale.

Cercetări orientate spre îmbunătățirea rezistenței materialelor plastice (polimerice) la solicitări mecanice și termice importante au avut ca rezultat elaborarea unor noi materiale de sinteza -*compozitele*- a căror producere și prelucrare a impus elaborarea unor tehnologii asociate ce au deschis un alt domeniu de activitate.

Atât în cazul plasturgiei, al elaborării și prelucrării compozitelor cât și în domeniul tehnologiilor mecanice clasice nu se exclude, în viitor, dezvoltarea intensivă bazată pe mecanizare, automatizare și cibernetizare în scopul reducerii normei de timp, sporiri calității produselor sau diversificării ofertei de producție.

Considerăm, astfel, că subiectul acestei teze se înscrie în tendința firească de evoluție a tehnologiei în general iar prin concluziile programului de experimentare și soluțiile tehnice oferite îmbogățește orizontul de cunoștere în domeniul reologiei materialelor vasco-elastice și propune procedeele de punere în formă a materialelor polimerice prin injecție și extrudare ca noi domenii de aplicabilitate a utilizării energiilor de înaltă frecvență.

## 2.2. Matrite pentru injectarea materialelor polimerice. Soluții constructive.

Ca procedeu de punere în formă a materialelor polimerice, injectarea presupune transferarea topiturii de material din cilindrul de plastifiere al unei masini specializate în spațiile libere închise (alveolare) denumite cuiburi ale unui dispozitiv special – matrita de injecție (Dym [44], Feher [51], Iclanzan [65], Maucotel [79], Menges [83], Reyne [102]). Aici, prin răcire libera sau forțată, topitura trece în stare solidă, forma geometrica a reperului rezultat fiind copia cavității cuibului.

Prima variantă constructivă de matrită de injectat a fost, desigur, cea cu injecție directă - în cuib - după modelul turnării materialelor metalice, figura 2.1 a

Pe lângă avantajele acestui tip de matrită - simplitate constructivă, mentenanță și exploatare facilă - trebuie avute în vedere și dezavantajele următoare:

- matrita este monocuib, de productivitate redusă;
- culea rămâne solidară cu piesa fapt ce presupune manopera suplimentară pentru separarea acestora și afectează considerabil norma de timp;
- aspect inestetic al urmei lăsate de operația de separare.

Utilizarea procedurii de injecție capilară, punctiformă, în matrită monocuib, elimină culea și dezavantajele legate de aceasta asigurând o ușoară creștere a productivității, figura 2.1.b

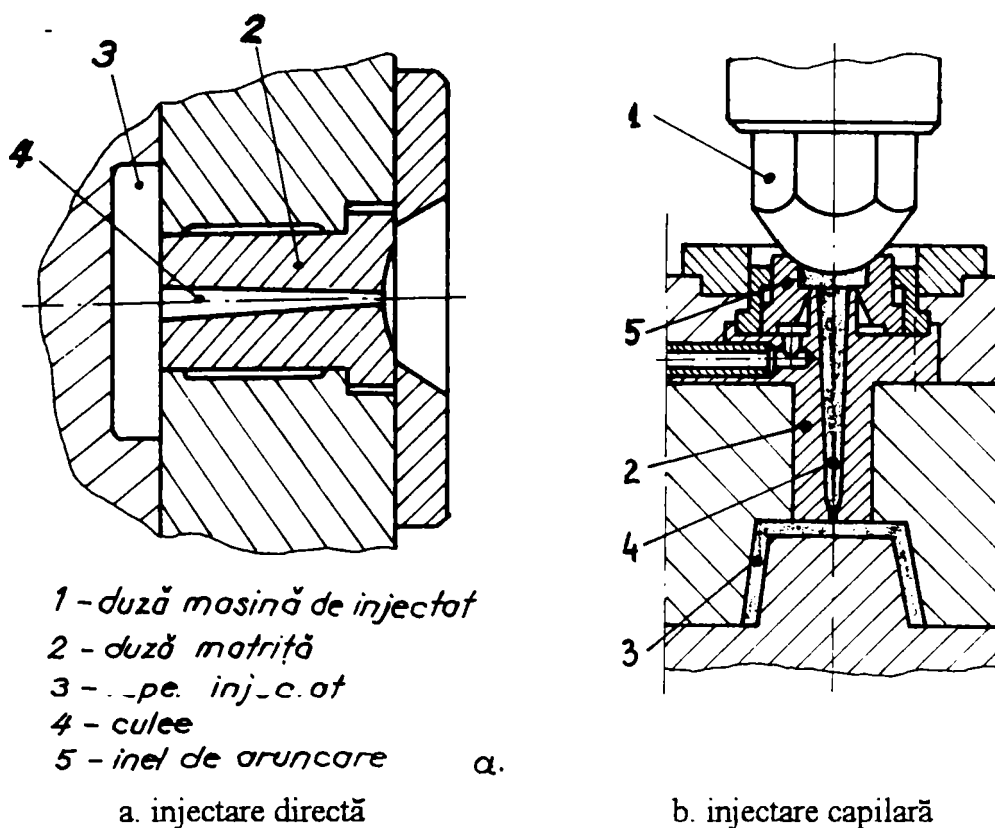


Figura 2.1 Matrita monocuib

Separarea piesei injectate din rețea se obține la deschiderea matriței fie prin ruperea rețelei în secțiunea de minimă rezistență - punctul de injectare - fie datorită acțiunii unui element culisant acționat pneumatic sau mecanic (cu arc).

Avantajele utilizării materialelor polimerice în locul celor tradiționale au fost hotărâtoare pentru impunerea acestei tehnologii iar demersurile pentru majorarea productivității au determinat realizarea și exploatarea matrițelor multicuib la care distribuția topiturii către cuiburile matriței se realizează printr-o rețea de injecție (distribuție). Acest sistem de injectare prezintă dezavantaje legate de consumul de manoperă pentru separarea din rețea și consumul suplimentar de material care, la fiecare ciclu de injectare, constituie culea și rețeaua de distribuție.

Pentru a se elimina acest consum de manopera și pentru a se asigura posibilitatea exploatării în ciclu automat a fost necesară rezolvarea problemei separării automate din rețea, la scoaterea din matriță, și s-au folosit:

- **procedeul de injectare punctiformă laterală**, în matrița multicuib echipata cu sistem de separare automata a piesei din rețea :
  - cu aruncatoare înclinate a caror acțiune determina deplasarea oblica a piesei în raport direcția de deschidere a matriței și separarea de rețeaua de injectare;

- cu sistem de aruncare acționat în trepte - se acționează întâi asupra plesii, care, astfel, iese din cuib, se îndepărtează de rețea și se separa de aceasta, apoi asupra rețelei pentru eliminarea ei din matrită ;
  - cu canale de tip tunel;
- *procedeu de injectare punctiformă centrală*, în matrită multicuib cu mai multe plane de separare la care apare necesitatea deschiderii după un al doilea plan de separare (pentru eliminarea rețelei de injectare) și, eventual, un al treilea plan de separare (pentru extragerea culeii), fapt ce afectează timpul de deschidere/închidere al matritei în sensul unei sensibile majorări nesemnificative însă față de economia de timp realizată prin eliminarea necesității separării de rețea a produselor injectării.

Aceste soluții asigură o productivitate mult sporită însă nu rezolvă problema consumului suplimentar de material pentru formarea rețelei și a culeii.

Pentru rezolvarea acestei ultime probleme menționate a fost conceput sistemul de injectare cu canale izolate care asigură menținerea în stare plastifiată a materialului procesat, de la intrarea în duza matritei până la punctul de injectare favorizând exploatarea matritei în ciclu automat, și are avantajul eliminării rețelei de injecție, a consumului de material pentru constituirea acesteia și implicit a planului de separare pentru scoaterea rețelei, dar prezintă un dezavantaj major: scoaterea din serviciu a matritei necesită demontarea acesteia și curățarea canalelor obturate cu material polimeric solidificat, operațiuni delicate și consumatoare de manopera.

Toate aceste procedee, menționate până acum, mai prezintă și un alt inconvenient: solidificarea materialului (sigilarea) în zona punctului de injectare la deschiderea matritei datorită contactului cu aerul. Temperatura suprafeței active a plăcii de formare scade până la aproximativ 50...100°C, temperatura mai mică decât  $T_v$ .

Pe baza conceptului sistemului de injectare cu canale izolate, prin redimensionarea secțiunii traseului de injectare, prin noi soluții constructive aplicate pentru partea finală a acestuia (duza finală de injecție) și pentru controlul temperaturii blocului de distribuție au fost elaborate și propuse uzului industrial matritele cu canale încălzite, figura 2.2. Acestea elimină dezavantajele utilizării matritelor de injectare cu canale izolate și reprezintă un nou pas evolutiv în procesarea prin injecție a materialelor polimerice, particularitatea lor constând în izolarea termică a subansamblului ce conține rețeaua de distribuție și amplasarea în acest bloc de distribuție denumit și bloc cald a unor elemente încălzitoare rezistive care, împreună cu izolarea termică, au menirea de a menține temperatura blocului cald între valori extreme prestabilite funcție de natura materialului polimeric procesat.

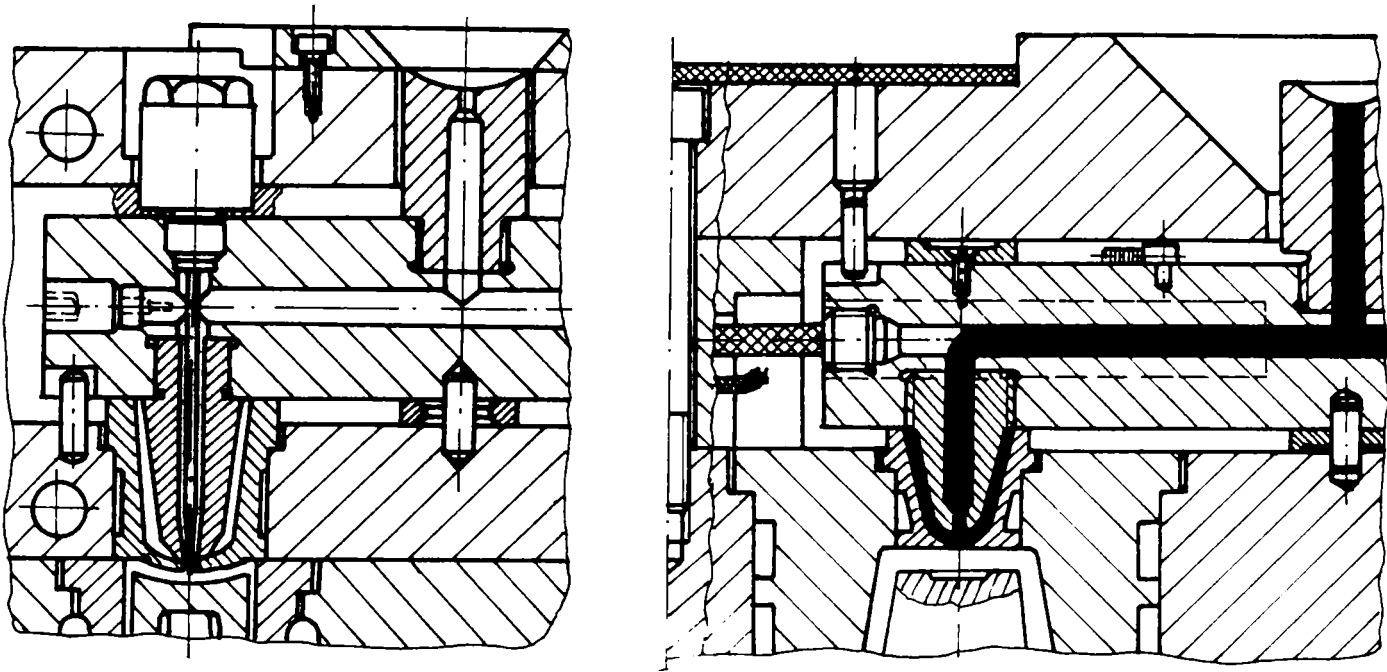


Figura 2.2 Matrite de injectare cu canale încălzite

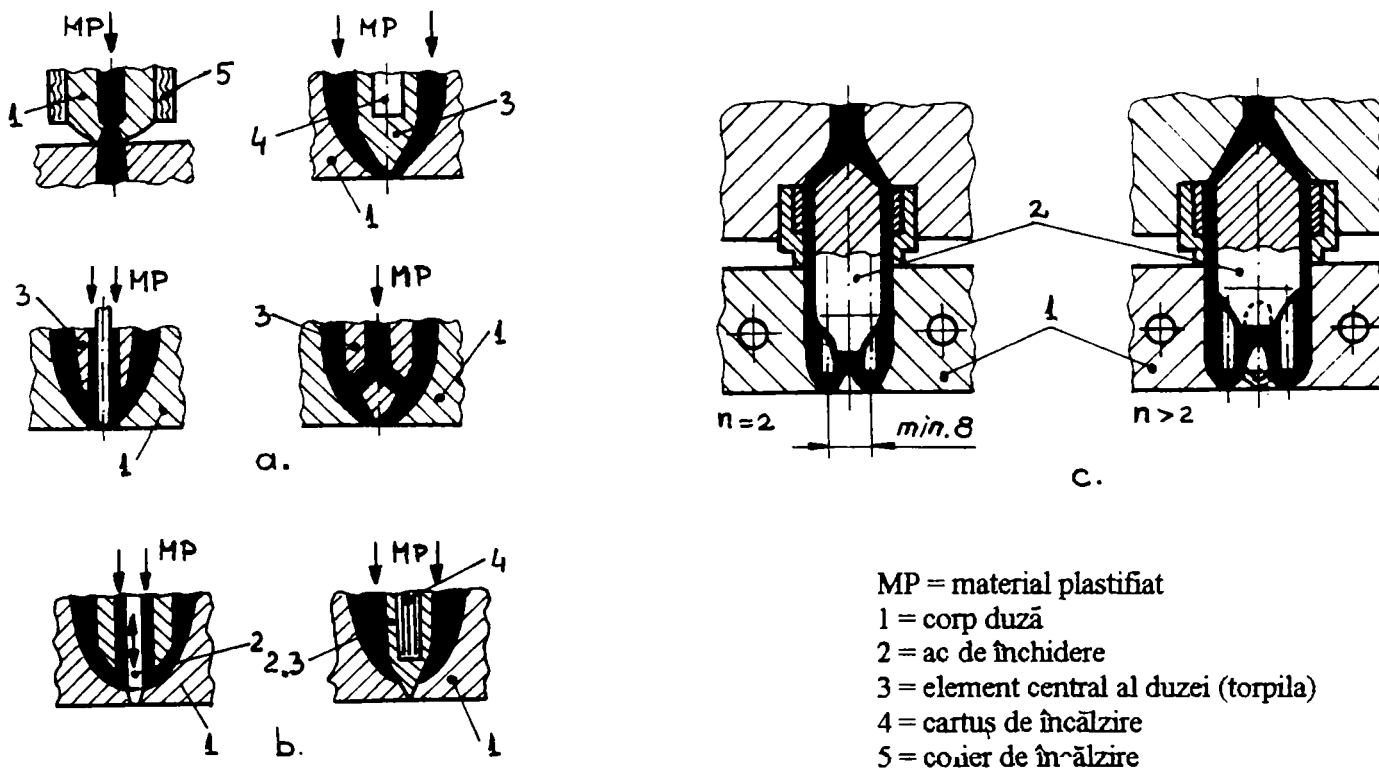


Figura 2.3 Soluții constructive pentru duzele finale ale matritelor cu canale încălzite (Feher [51], Iclanzan [65])

Duzele sistemului de injectare cu canale încălzite se execută într-o multitudine de variante constructive, figura 2.3, unele având caracteristica comună de a păstra tot timpul legătura directă dintre rețea și cuib, figura 2.3a, spre deosebire de altele care după injectare se închid cu un știft (ac) sau torpilă încălzită, figura 2.3b.

În cazul duzelor fără închiderea orificiului de intrare în cuib, secțiunea acestuia este de valoare redusă ( $D_{max} = 1...2 \text{ mm}$ ) astfel încât aceste soluții tehnologice sunt folosite pentru injectarea unor volume reduse de material plastifiat în cuib ( $100...300 \text{ cm}^3$ ). Pentru realizarea prin injectare a pieselor ce necesită injectarea unor volume mai mari de material este necesar a se folosi mai multe astfel de duze pentru umplerea aceluiași cuib sau a se utiliza o duză cu orificii multiple, figura 2.3c. Aceste duze sunt mult mai complexe, din punct de vedere constructiv, și așa cum s-a menționat într-un paragraf anterior, materialul solidificat la intrarea în cuib (ieșirea din duză) poate obtura ireversibil punctul de injectare prin formarea dopului de sigilare sau acesta poate fi împins în cuib, ambele situații fiind defavorabile (se întrerupe regimul de lucru automat sau piesa prezintă neomogenități ce pot afecta aspectul estetic sau rezistența mecanică a produsului prin formarea unui concentrator de efort).

Dupa injectarea propriuzisă (umplere a cuibului + îndesarea materialului topit), închiderea orificiului prin care materialul plastifiat a fost transferat în cuib poate însă înlătura posibilitatea formării “dopului” în orificiul de injectie, a dezavantajelor generate de acesta oferind și posibilitatea utilizării unor orificii de injectare de secțiune mult sporită fără pericolul formării “firelor de tragere”.

Au fost concepute astfel duzele cu element central mobil (de închidere) a punctului de injectare care realizează obturarea automatizată a punctului de injectare, figura 2.4, acționarea acului realizându-se mecanic, figura 2.4a (cu arc, eventual tijă de comandă, soluții constructive pentru care deschiderea pentru un nou ciclu de injectare se face datorită presiunii dezvoltate de materialul plastifiat în momentul injectării) sau pneumatic/hidraulic, figura 2.4b (soluție ce oferă o mai mare flexibilitate în programarea fazelor injectării pe mașini de injectie NC).

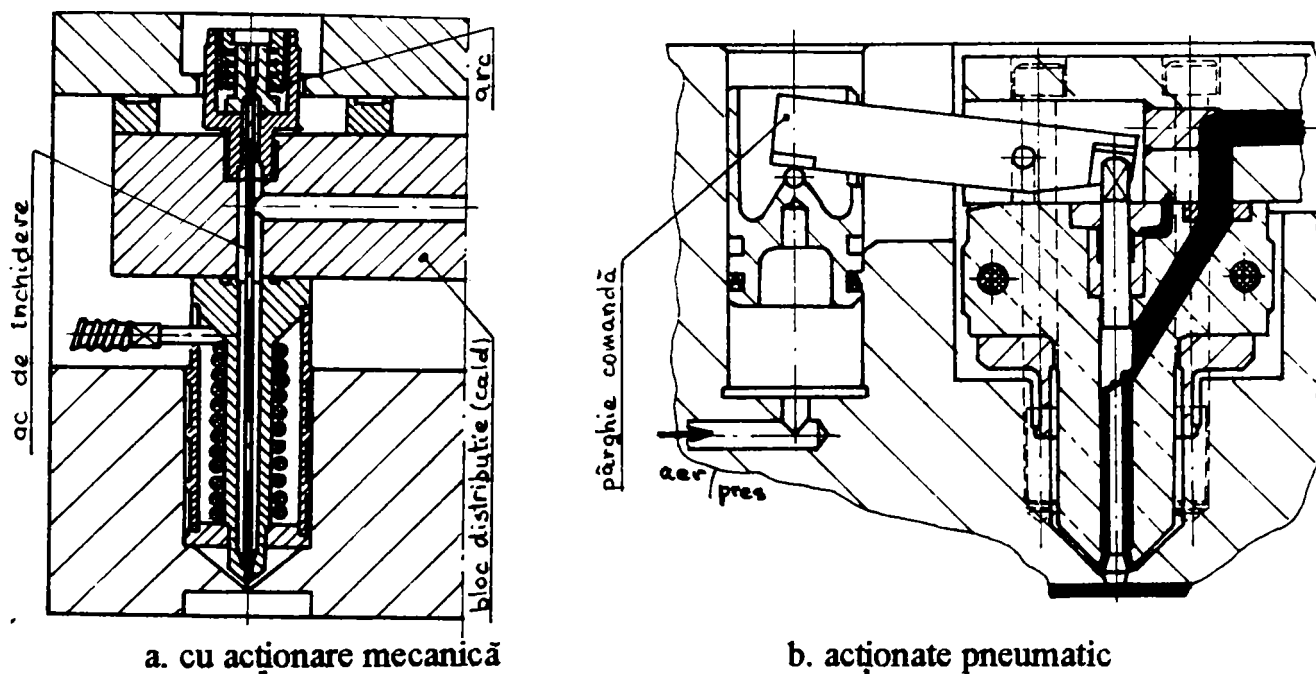


Figura 2.4 Duze finale de injectie cu închidere cu ac



Temperatura materialului plastifiat, injectat sub presiune în rețea, scade progresiv pe măsură ce lungimea traseului parcurs crește și prezintă o valoare minimă în vecinătatea orificiului de intrare în cuib (punct de injectare) respectiv a ieșirii din filiera de extrudare.

Pentru ca temperatura materialului  $T_{max}$  în acest punct să fie mai mare decât temperatura minimă necesară pentru procesarea materialului se practică încălzirea termostatăă a blocului cald în care este încorporat traseul de injectare dar, uneori, asigurarea unei temperaturi minim necesare la intrarea în cuib presupune supraîncălzirea materialului la începutul traseului pe care îl parcurge, figura 2.5.

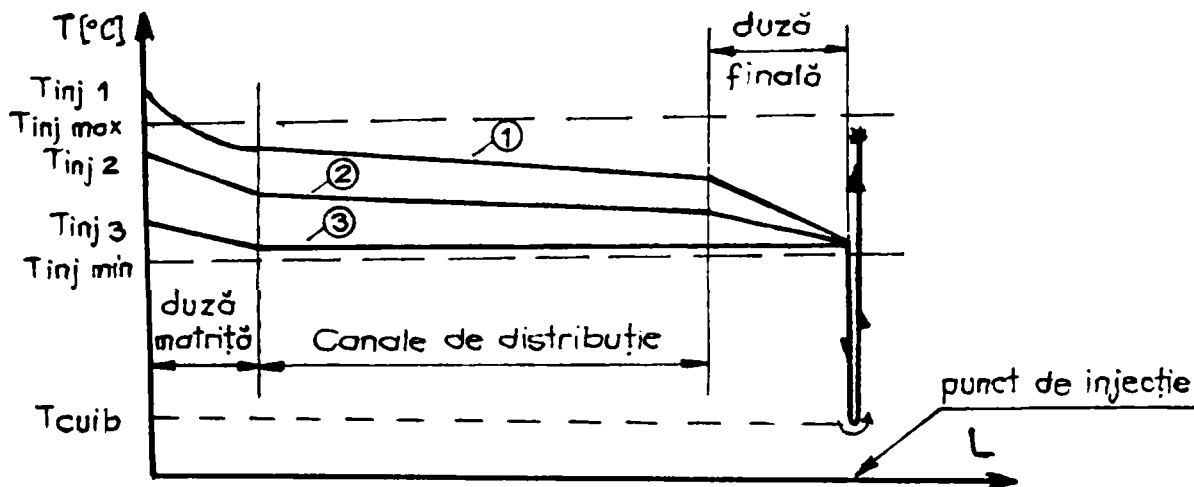
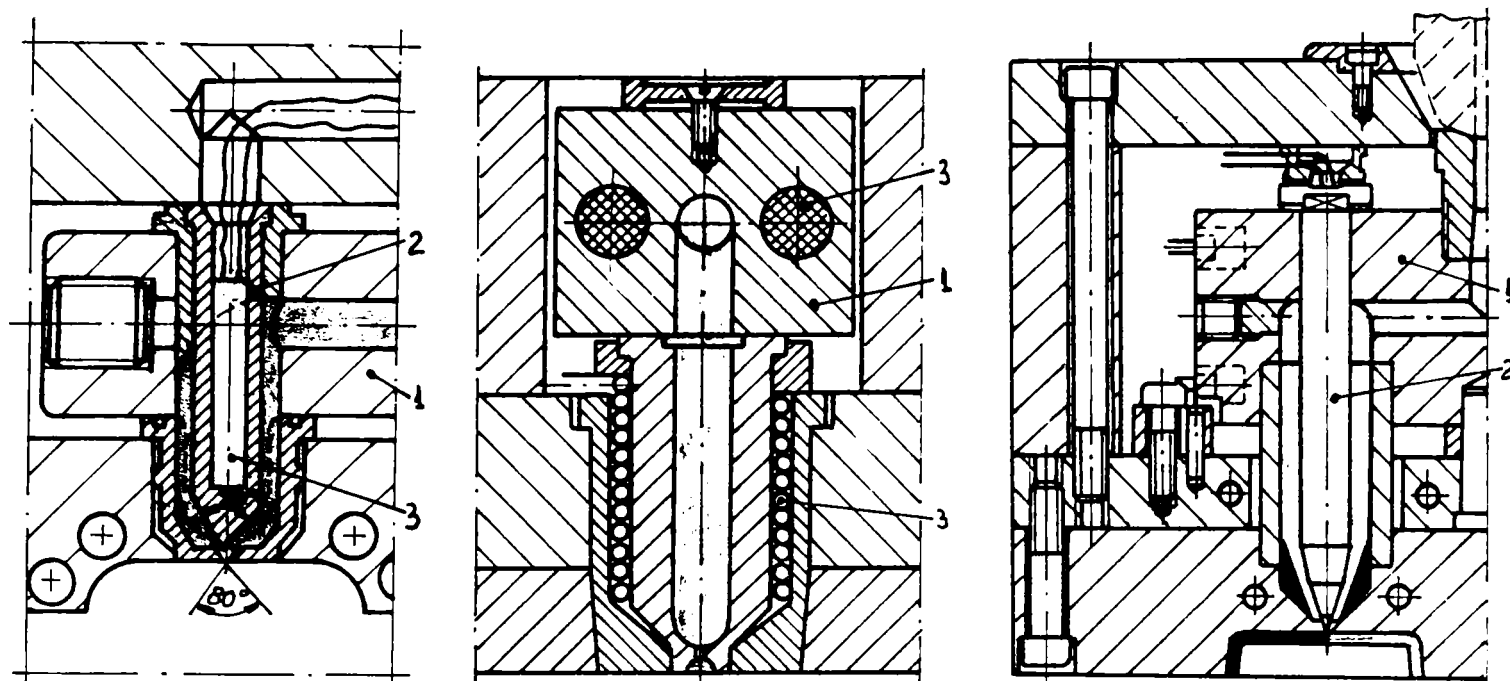


Figura 2.5 Evoluția temperaturii topiturii în funcție de lungimea traseului parcurs

Pentru a evita această situație se practică încălzirea localizată a materialului în zona critică, finală, a traseului de curgere prin plasarea unor elemente încălzitoare rezistive în duza finală, figura 2.6.

Materialul plastifiat care trece prin aceste duze este ușor încălzit ceea ce are un efect benefic asupra capacității sale de a umple în totalitate și uniform cavitatea de formare. Consumul energetic, individual, al acestor elemente încălzitoare este de 150...700 (1000) W/h fapt ce duce la o ușoară majorare a cheltuielilor de producție.

Dezavantajele acestor tipuri de matrite, cu canale calde decurg din necesitatea utilizării de duze finale plasate în vecinătatea imediată a cuibului (zona cu temperatura mai scăzută decât cea a topiturii) care pun probleme delicate de izolare termică în condițiile unor consumuri considerabile de energie pentru asigurarea unor condiții optime de fluidizare a materialului ce se injectează în cuiburi.



1 - bloc de distribuție

2 - torpila încălzită

3 - element de încălzire rezistiv

Figura 2.6 Duze finale încălzite

Soluțiile constructive de duze finale pentru matrite cu canale încălzite înregistrează un progres continuu, direcțiile de dezvoltare fiind dictate de considerente de ordin practic, de aplicabilitate în condițiile particulare de realizare a diferitelor repere complexe.

Demnă de remarcat, dintre noutățile în acest domeniu, este duza de injecție cu închidere cu ac oblic, acționat cu motor liniar pneumatic, variantă constructivă oferită de către firma DME, figura 2.7

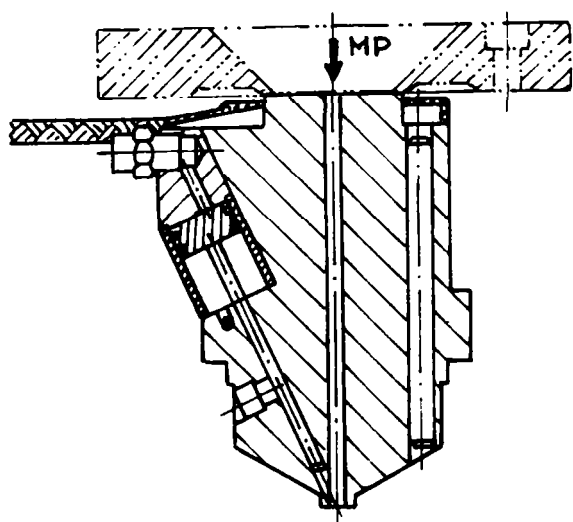


Figura 2.7 Duză DME cu închidere cu ac oblic

Avantajele acestei construcții constau în volumul mare de material ce poate fi transferat în cuib într-un timp foarte scurt și controlul facil al închiderii orificiului de injecție.

Injecția cu canale încălzite este considerat procedeul cel mai modern utilizat în prezent asigurând multiple avantaje și un spectru larg de aplicare în ciuda relativei complexități constructive.

Consumul energetic important necesar termostătării blocului cald și complexitatea soluțiilor constructive a căror scop este împiedicarea formării sau eliminarea dopului care obturează orificiul de acces în cuib (duze finale cu închidere și duze cu element central încălzit – Thermoplay, Spear, etc) constituie o provocare pentru perfecționarea acestor subansamble a căror utilizare este larg răspândită în mediul industrial.

### **2.3. Extrudarea materialelor termoplaste. Soluții constructive pentru filierele de extrudare**

Extrudarea, ca procedeu de transformare continuă, presupune trecerea forțată a topiturii de material termoplast prin spații tehnologice anume create, de secțiune adaptată geometriei profilului ce se urmărește a fi realizat.

Extruderul, mașina specializată care asigură punerea în topitură a materialului termoplast și alimentarea continuă a dispozitivului de formare este, în mare parte, asemănătoare unităților de injectare a mașinilor de injectat.

Însă, în cazul procesării materialelor termoplaste prin extrudare, ansamblul mașina – dispozitiv de formare este mult simplificat, comparativ cu cel utilizat la punerea în forma prin injectare deoarece:

- melcul rotativ al cilindrului de plastifiere nu este folosit și ca piston;
- lipsesc platourile fix și mobil, unitatea de închidere și blocare și cea de acționare a sistemului de aruncare;
- dispozitivul de formare, denumit filieră sau cap de extrudare, este atașat extremității cilindrului de plastifiere și are o complexitate constructivă mult redusă în raport cu matritele de injectare, funcțiile sale limitându-se la:
  - a asigura curgerea laminară a topiturii printr-un spațiu liber tehnologic de secțiune corespunzătoare profilului transversal al produsului de realizat;
  - prin funcționarea elementelor rezistive de încălzire și a senzorilor de temperatura, să compenseze, prin termostatare, răcirea materialului la ieșirea din cilindrul de plastifiere și să asigure continuitatea curgerii.

Produsul extrudării este trecut apoi printr-un dispozitiv de răcire/calibrare a cărui rol este de a fixa forma profilului prin punerea acestuia în stare solidă.

Deoarece filierele de extrudare sunt dispozitive mult mai simple decât matritele de injectare gama soluțiilor constructive reprezentative este redusă, figura 2.8.

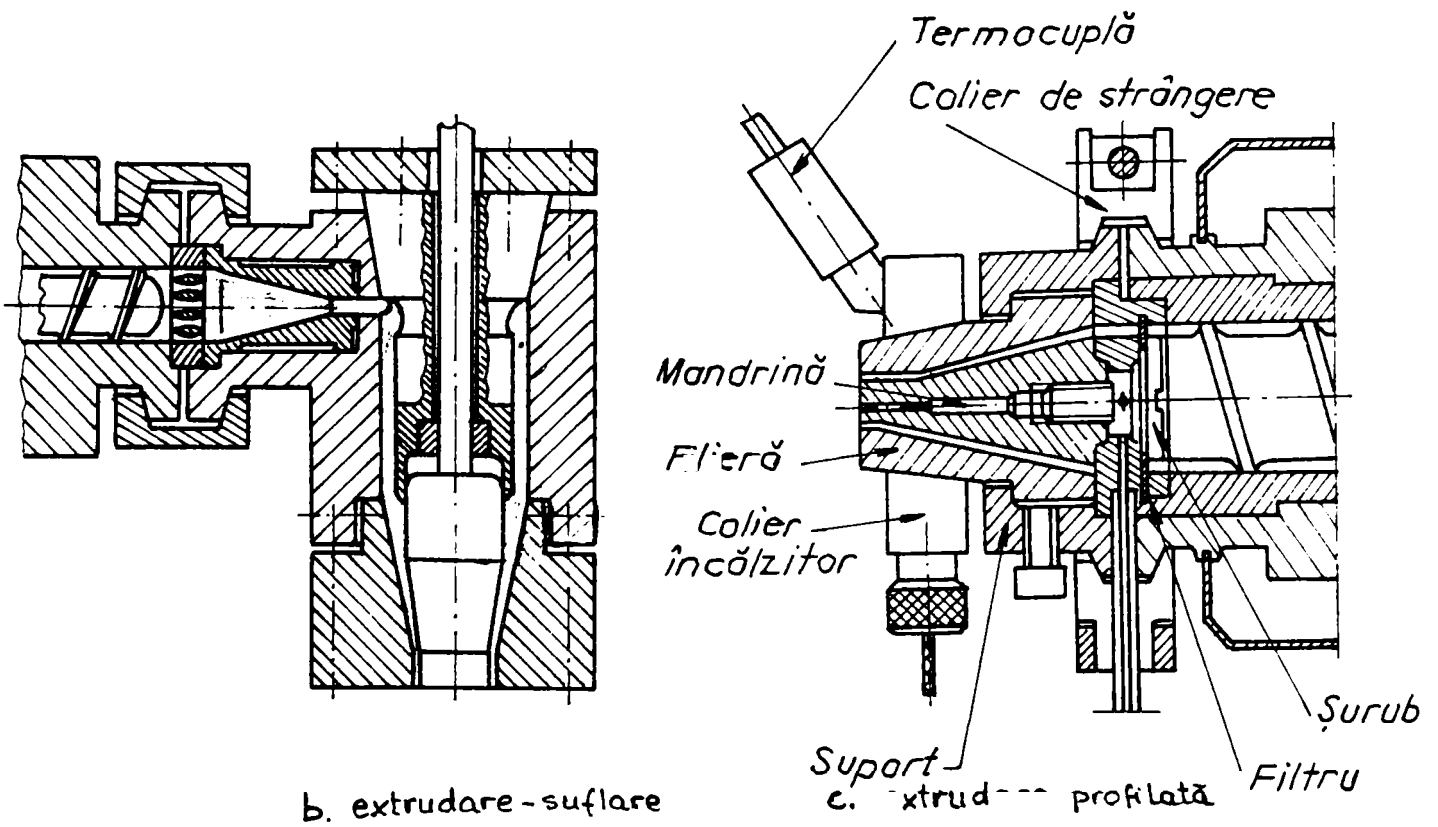
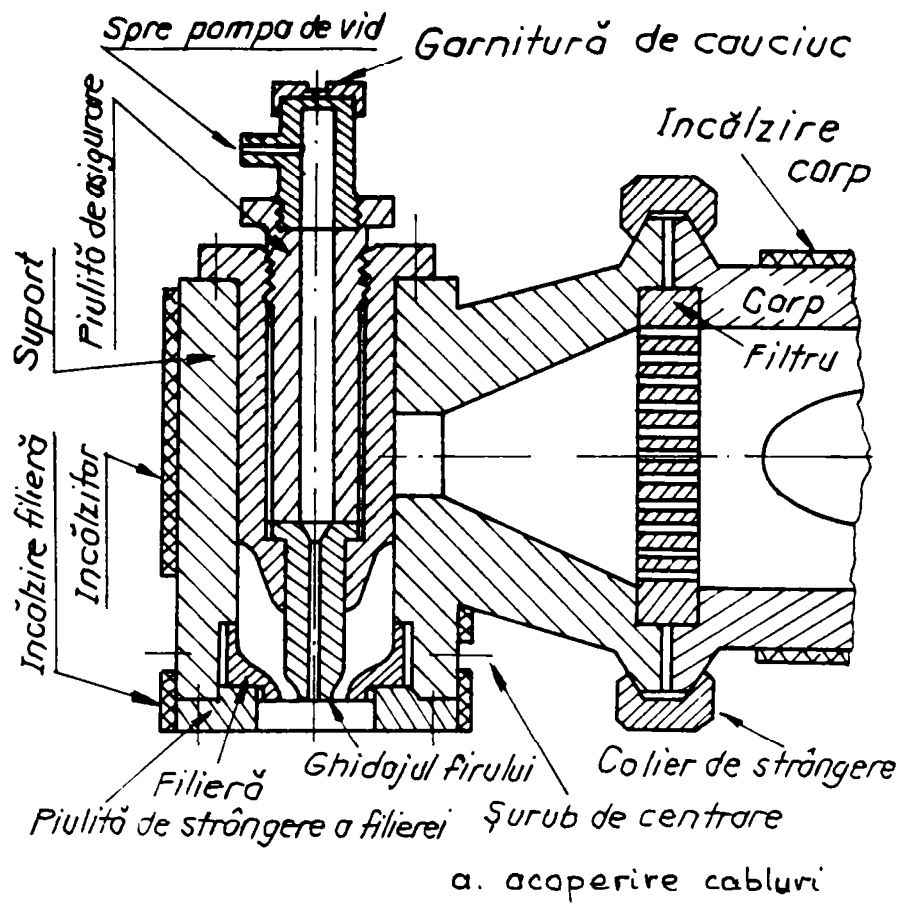


Figura 2.8 Filiere de extrudare

După cum s-a amintit în capitolul 1, în practica industrială, la extrudarea profilelor tubulare se constată frecvent apariția defectelor de extrudare manifestate prin ridarea sau chiar fisurarea suprafeței interioare a produsului (și, în mod implicit, inducerea unor tensiuni interioare care determina apoi deformarea prin curbare a profilului extrudat). Aceasta situație este cauzată de distribuția neuniformă de temperatură în secțiunea transversală de curgere, de diferențe importante între comportamentul reologic al topiturii în vecinătatea celor doi pereți a-i secțiunii de curgere: interior (temperatură și viteza de curgere mai mică) și exterior (temperatură mai mare datorită aportului termic al colierului de încălzire al filierei de extrudare).

Analiza derulării procesului de extrudare prin prisma defectelor ce le prezintă extrudatul în anumite condiții de procesare, scoate în evidență dezavantajele acestor dispozitive:

- necesită prelucrarea foarte precisă, la valori mici de rugozitate, a suprafețelor elementelor active de la ieșire, element central și duza profilată. Acesta condiție se impune pentru a facilita alunecarea materialului polimeric plastifiat pe pereții canalului de curgere și pentru a evita curgerea în regim de debit oscilant și apariția defectelor de extrudare;
- distribuția neuniformă a temperaturii în secțiunea de curgere cu valori mai reduse spre interior, în zona elementului central ce dă forma interioară a piesei, și mai ridicate înspre exterior, unde este plasat colierul de încălzire. Din considerente de limitare a temperaturii de procesare atât ca valoare inferioară, pentru a asigura curgerea, cât și ca valoare superioară, pentru a evita arderea materialului, este posibil ca suprafața exterioară a elementului central să se găsească la o temperatură mai mică decât cea optimă de procesare. Această situație poate determina aderența materialului plastifiat pe pereții canalului de curgere și amorțirea fenomenului de stick-slip care afectează calitatea suprafeței interioare a extrudatului;
- depășirea unei valori maxime admisibile pentru debitul de material extrudat poate determina instalarea unui regim de curgere de debit instabil, oscilant (ca urmare a manifestării efectului "slip-stick" după o schemă alternantă adeziune-alunecare) și generarea de defecte de extrudare majore.

Stimularea curgerii materialului pe suprafața domului central care dă suprafața interioară a extrudatului poate fi soluția pentru înlăturarea unei astfel de situații nefavorabile și de preîntâmpinare a apariției defectelor asociate.

Activarea ultrasonica ar putea fi soluția ideală pentru atingerea acestui scop și, în plus, poate asigura reglajul termic al zonei centrale a dispozitivului în vecinătatea secțiunii de ieșire.

## 2.4. Termostatarea dispozitivelor pentru procesarea materialelor polimerice

Termostatarea ansamblului dispozitivului de punere în formă a materialului polimeric constituie soluția optimă pentru asigurarea menținerii în timp a unei valori prestabilite, prescrise, de temperatură a topiturii.

Sistemul de termostatare, a cărui schemă de principiu este redată în figura 2.9, are în componența sa - în mod obligatoriu - cel puțin un senzor de temperatura S (de contact, termocuplă, sau fără contact, cu vizare în infraroșu) generator de semnal electric a cărui intensitate este proporțională cu temperatura în punctul de măsurare, un element de încălzire (de obicei rezistiv), R, și un aparat specializat cu funcționalitate complexă, A, ce asigură următoarele funcții de baza:

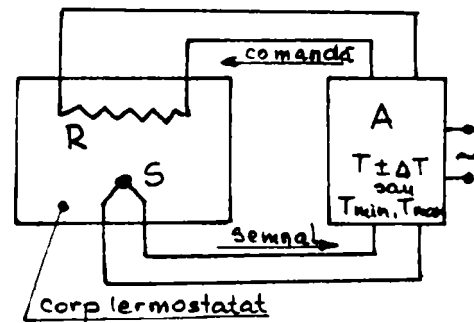
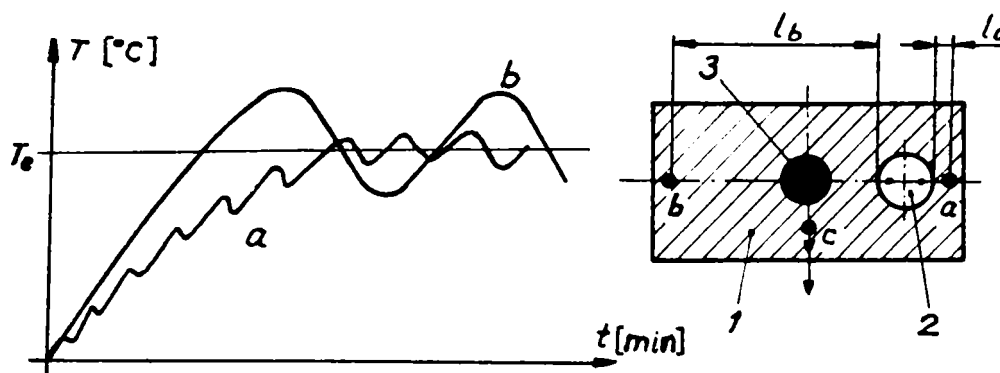


Figura 2.9 Schema de principiu a sistemului de termostatare

- permite reglajul la o anumită valoare de temperatura,  $T$  (și a toleranțelor la această valoare), sau a limitelor admisibile de variație a temperaturii elementelor termostatate:  $T_{min}$  și  $T_{max}$ ;
- din timp în timp compară nivelul semnalului primit de la senzor cu nivelul de referință corespunzător valorilor de temperatura prescrise (reglate pentru termostatare);
- funcție de rezultatul comparării, comandă bransarea sau debransarea de la rețeaua electrică a elementului de încălzire.

De cele mai multe ori elementele componente ale ansamblului termostatat sunt metalice, cu o pronunțată inerție termică iar punctul de măsurare este în vecinătatea sursei de căldură, după caz, mai mult sau mai puțin apropiat de aceasta.

Tinând seama de aceste condiții de lucru și de faptul că reglajul sistemului nu se face pentru o anumită valoare de temperatură ci pentru un interval de valori ( $T \pm \Delta T$  sau  $T \in T_{min} \dots T_{max}$ ), exploatarea unui astfel de sistem care se bazează pe principiul buclei de reacție (feed-back) presupune luarea în considerare a unor timpi de reacție corespunzători transmiterii unei valori instantanee de flux termic prin volumul de material ce desparte sursa de căldură de punctul de măsurare. În acest timp, în condițiile unor pierderi constante de energie termică prin convecție-conducție, starea activă sau inactivă a sursei de căldură se menține astfel încât sunt inevitabile ușoare variații termice ciclice în diferitele puncte ale ansamblului termostatat, figura 2.10.



1 = bloc metalic; 2 = spațiu pentru amplasarea patronului de încălzire; 3 = canal transfer topitura  
 Figura 2.10 Evoluția temperaturii în diferite puncte ale unui bloc metalic termostatat  
 Iclanzan [65], Feher [51]

### Măsurarea temperaturii cu termocuple

Forța electromotoare (f.e.m.) dezvoltată de un circuit tip termocupla, figura 2.11a, constituie un mijloc indirect dar precis de determinare a temperaturii unei jonctiuni (efectul Seebeck) în cazul în care se cunoaște temperatura celeilalte jonctiuni, Millet [88]. Pentru montajul din figura 2.11b, rezultă o f.e.m. generată de opoziția a două forțe electromotrice  $E_{T1}$  și  $E_{T2}$  după relația:

$$E_{\text{masurat}} = E_{T1} - E_{T2}, \quad [\text{mV}] \quad (2.1)$$

( $T_1 \neq T_2, T_2 = T_3 = \text{temperatura suduri rece}$ )

Dacă la valoarea măsurată (indicată) se adaugă t.e.m. corespunzătoare temperaturii  $T_2$ , valoarea obținută este t.e.m. corespunzătoare temperaturii  $T_1$ :

$$E_{T1} = E_{\text{masurat}} + E_{T2}, \quad (2.2)$$

iar temperatura sudurii calde se determina funcție de  $E_{T1}$  folosind tabele de echivalență sau aparatură special concepută în acest scop:

$$T_1 = f(E_{T1}), \quad [T_1] = ^\circ\text{C}; \quad (2.3)$$

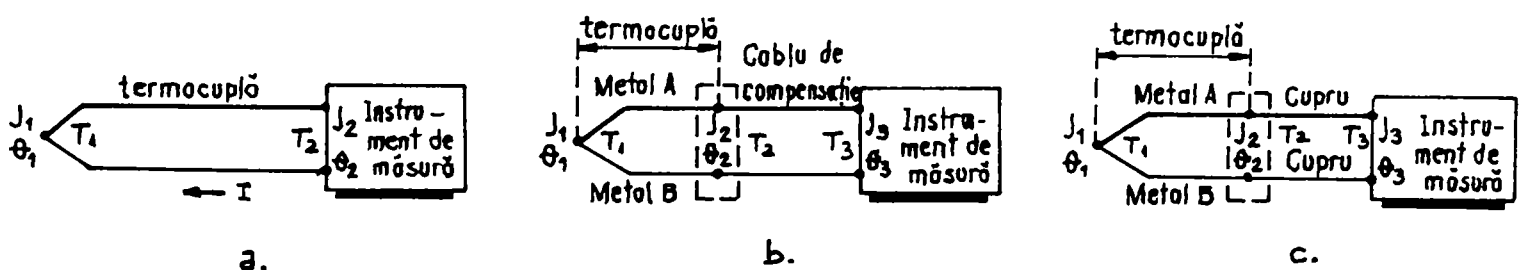


Figura 2.11 Termocuplă. Schemă electrică

Un montaj frecvent utilizat în laborator este cel cu termocupla singulară, fără cablu de compensatie, figura 2.11c, ce are avantajul simplității și fiabilității dacă se respectă următoarele:

- se aleg conductori de cupru de secțiune uniformă, care nu dau t.e.m. între 0 - 100 °C;
- se asigură izotermia sudurilor reci  $J_2$  și  $J_3$ ;
- trebuie cunoscută temperatura joncțiunilor  $J_2$  și  $J_3$ .

Corecția pentru sudura rece se face în  $J_2$  pentru  $T_2 > T_3$  sau în  $J_3$  pentru  $T_2 = T_3$ . Pentru etalonare sau verificarea tipului de termocuplă, se folosește relația (2.2) în care t.e.m. generată de sudura rece se determină din nomograme sau tabele de tipul celor prezentate în ANEXA, iar pentru determinarea temperaturii sudurii calde funcție de  $E_{T1}$  - relația (2.3), se folosesc tabele de echivalență

$E_{T1}$ , [mV] -  $T_1$ , [°C].

**Termocuple uzuale:**

R = platina - 13% rodium / platina;	J = Fe / Cu - Ni;
S = platina - 10% rodium / platina;	E = Ni - Cr / Cu - Ni;
B = platina - 30% rodium / platina - 6% rodium;	T = Cu / Cu - Ni;
K = Ni - Cr / Ni - Al (cromel-alumel)	

(prin convenție primul metal sau aliaj menționat este cel electropozitiv).

**Exemple de montaje de laborator.** Funcție de schema electrică în care se folosesc se definesc montajele (cu un singur aparat de măsură):

- serie, figura 2.12a - tensiunile electromotoare se însumează;  
- pentru termocuple ce dau t.e.m. de valoare mică;
- paralel, figura 2.12b - pentru a obține o valoare medie a temperaturii din câmpul de măsurare;
- cu termocuple multiple, figura 2.12c - pentru determinarea distribuției de temperatura dintr-un câmp de măsurare (puncte multiple de măsurare);
- cu termocuple montate în opoziție, figura 2.12d - pentru determinarea diferenței de temperatură între două puncte de măsurare.

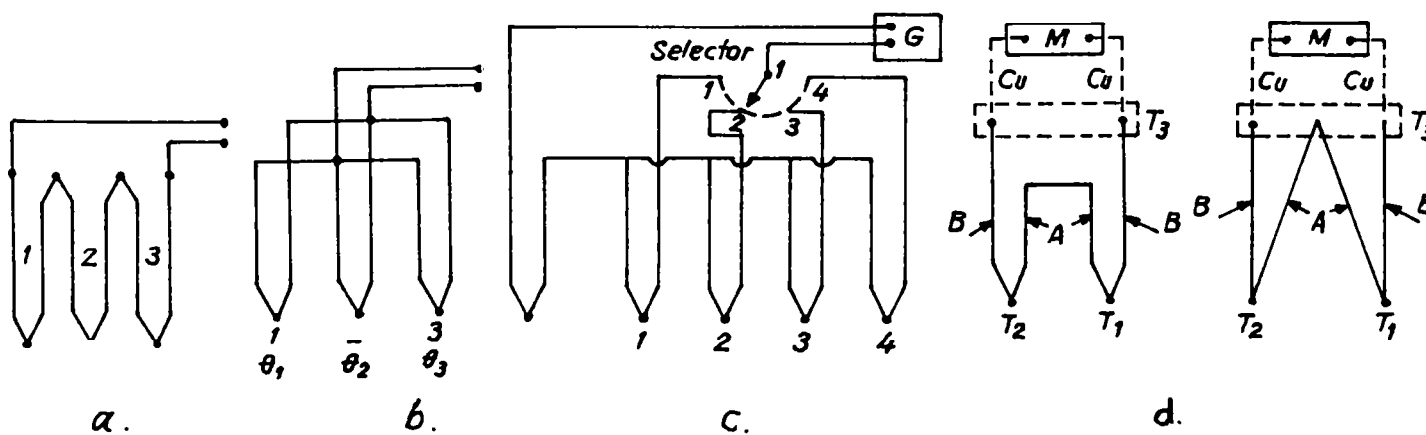


Figura 2.12 Termocuple în montaje de laborator



## 2.5. Concluzii

Temperatura materialului plastifiat, injectat sub presiune în retea/extrudat, înregistrează o scădere odată cu intrarea în dispozitivul de punere în formă și prezintă o valoare minimă în vecinătatea orificiului de intrare în cuib (punct de injectare)/ieșirii din filiera de extrudare. Pentru ca temperatura materialului  $T_{mat}$  în acest punct să fie mai mare decât temperatura minimă de procesare a materialului dar pe traseul de injectare să nu depășească  $T_{mat\ max}$  este de dorit încălzirea localizată a materialului - doar în vecinătatea acestui punct. O astfel de cerință poate fi satisfăcută de utilizarea activării ultrasonice a elementului central al dispozitivului de procesare a materialului polimeric, astfel încât în zona critică, de ieșire din dispozitiv, materialul plastifiat să beneficieze de efectele activării ultrasonice.

În cazul injectării, după închiderea matritei și înaintea începerii fazei de injectare, o scurtă activare ultrasonică de energie moderată, 50...100 W, oferă o concentrare de energie ultrasonică în vecinătatea punctului de injecție și poate permite topirea dopului de sigilare format la deschiderea matritei. Soluția constructivă a duzei finale activată ultrasonic ar putea înlocui, astfel, variantele de duza finală cu închidere cu ac sau torpila. Este posibilă, de asemenea, diminuarea consumului energetic prin reducerea numărului de cartusele încălzitoare din blocul cald - nu este necesară supraîncălzirea materialului - și se poate elimina cartușul încălzitor din duza finală de injecție. Puterea instalată se reduce, în medie, cu cel puțin 500 W pentru fiecare cuib al matritei.

În cazul extrudării, activarea ultrasonică ar putea oferi posibilitatea de control și reglaj a vitezei de deplasare a materialului în vecinătatea peretelui dornului central, a temperaturii materialului în secțiunea de ieșire, situație care, pentru extrudarea prin secțiuni de curgere asimetrice, poate permite echilibrarea profilului de viteze în secțiunea de curgere, evitarea inducerii unor tensiuni interne la trecerea prin dispozitivul de răcire și evitarea apariției unor defecte manifestate pe suprafețele interioare ale produselor tubulare.

Analiza eficienței tehnico-economice a gamei diversificate de dispozitive utilizate în procesarea materialului polimeric a determinat orientarea studiului asupra matritei de injectat cu canale calde - pentru injecție, figurile 2.2, 2.4, și asupra capului de extrudare cu poanson reglabil figura 2.8b. Dispozitivele menționate sunt larg utilizate în celulele flexibile de procesare a materialelor polimerice și din punct de vedere tehnic, înlocuirea elementului central al acestora cu

concentratorul unui ansamblu ultrasonic oferă posibilitatea adaptării, printr-un minim de modificări, a soluției constructive clasice la activarea ultrasonica .

Soluțiile ce urmează a fi prezentate se înscriu astfel în tendința de implementarea unor noi variante de componente sau subansamble tipizate pentru echipamentele tehnologice de procesare a materialelor polimerice.

Din punct de vedere al complexității și a problemelor tehnologice ridicate, de realizare a reperelor componente, aceste soluții sunt comparabile cu variatele clasice ale dispozitivelor din care derivă și a căror utilizare este larg răspândită în producția de serie.

**Posibilitatea aplicării ultrasunetelor la activarea proceselor  
de transformare a materialelor polimerice**

**3.1. Principiile activării ultrasonice.**

Vibrațiile elastice reprezintă variații periodice de stare a mediului a căror propagare este condiționată de existența legăturilor elastice între particulele mediului material activat.

Datorită continuității mediului elastic, deplasarea unui punct material sub acțiunea forței exterioare perturbatoare crează în mediul de propagare tensiuni elastice care, acționând în fiecare volum infinitesimal, determină abaterea fiecărei particule a mediului continuu de la poziția ei normală, de echilibru, cu valoarea infinitesimală  $x$ . Poziția particulelor învecinate este deasemenea modificată, iar ca răspuns, în baza principiului acțiune-reacțiune, acestea dezvoltă forțe de reacțiune, de asemenea de natura natură elastică, ce tind să aduca la starea inițială particula a cărei poziție a fost perturbată. Se crează astfel condițiile de propagare, sub formă de undă, a perturbației inițiale determinată de acțiunea unei forțe exterioare. Ca urmare a manifestării forțelor de inerție, proprii oricărei mișcări, particulele continuă să oscileze în jurul unei poziții medii chiar și după trecerea undei, Rozenberg [105], Bădărău [10], Drăgan [42], Beyer [22].

În condiții ideale, mediul perfect elastic, liniar, omogen, izotrop și conservativ, unda se transmite fără pierderi în mediul activat (se conservă valoarea amplitudinii de oscilație). În realitate, mediul de propagare este elasto-plastic ceea ce determină pierderi progresive de energie a undei și amortizarea în timp a acesteia, factorul de atenuare (amortizare) fiind funcție natura materialului, de proprietățile elastice ale acestuia, figura 3.1.

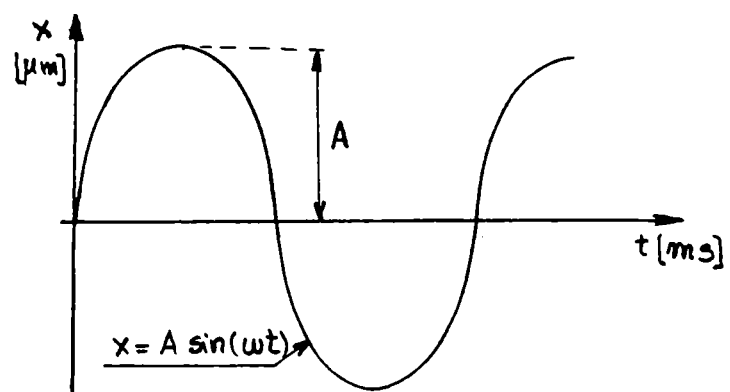
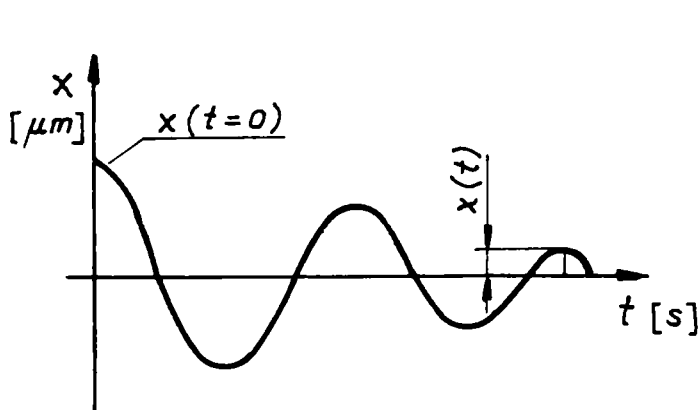


Figura 3.1 Amortizarea undei în mediul de propagare      Figura 3.2 Oscilații sinusoidale întreținute

In cazul în care asupra sistemului acționează o forță exterioară  $F_0$ , care variază după o lege armonică de pulsație  $\omega_0 = \text{const.}$ , amplitudinea și perioada de oscilație se mențin la valori constante dar defazajul dintre forță și elongația sistemului este zero doar dacă lipsește amortizarea în sistem,  $\delta = 0$  (mediul perfect elastic). In caz contrar,  $\delta \neq 0$ , interacțiunea complexă dintre particulele mediului determină manifestarea fenomenului de rezonanță, când amplitudinea oscilațiilor forțate rămâne constantă ca și valoare, figura 3.2, și atinge un maxim la o frecvență a forței aplicate, denumită frecvență de rezonanță.

### 3.2. Mărimi caracteristice

In accepțiunea tehnică ultrasunetele se definesc ca oscilații elastice întreținute, în regim de rezonanță, cu frecvență între 16 kHz și 3 MHz, mărimile caracteristice ale undelor ultrasonice fiind (Bădărău [10], Amza [6], Kuttruff [70], Iclănzan[67]):

- perioada de oscilație  $T$ , [s] – reprezintă timpul în care se efectuează o oscilație completă a particulei materiale;
- lungimea de unda  $\lambda$ , [m], este spațiul parcurs de undă în timpul  $T$ ;
- frecvența de oscilație  $f$ , [Hz], reprezintă numărul de oscilații efectuate într-o secundă;
- viteza undei în mediul de propagare  $C$ , [m/s], este spațiul parcurs de perturbație în unitatea de timp. Aceste mărimi sunt corelate potrivit următoarelor relații:

$$f = \frac{1}{T}, \quad \lambda = \frac{C}{f} = C \cdot T, \quad (3.1), (3.2)$$

- presiunea acustică  $p$ , [ $\text{N}/\text{m}^2$ ], reprezintă diferența dintre presiunea totală  $p_t$  din mediul de propagare și presiunea statică  $p_0$  din mediu în lipsa prezenței undei ultraacustice;
- puterea acustică  $P = S \cdot \frac{P_e}{C}$ , [W], (3.3)

în care:  $S$  = aria secțiunii transversale prin mediul de propagare, [ $\text{m}^2$ ],  
și  $p_e$  = presiunea acustică efectivă, [ $\text{N}/\text{m}^2$ ].

- intensitatea acustică  $I = P / S$ , [ $\text{W}/\text{m}$ ], (3.4)  
este puterea acustică transmisă prin unitatea de arie radiantă.

In orice moment, starea unui punct oarecare din volumul de material activat este caracterizată de valori bine determinate ale deplasării vitezei și accelerației. La momentul de timp  $t = 0$ , când corpul a fost scos din starea de echilibru și a început să oscileze, valoarea instantanee a deplasării (elongației) va fi :

$$x = A \cdot \sin \omega \cdot t = A \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t, \quad (3.5)$$

relație în care  $A$  = amplitudinea oscilației;  $f$  = frecvența de oscilație.

Viteza de deplasare instantanee va fi egală cu derivata deplasării în raport cu timpul

$$v = dx / dt = A \cdot \omega \cdot \cos \omega \cdot t, \quad (3.6)$$

astfel încât valoarea maximă a vitezei de oscilație (pentru  $\cos \omega \cdot t = 1$ ) va fi:

$$v_{\max} = \omega \cdot A = 2\pi \cdot f \cdot A, \quad (3.7)$$

Derivând în raport cu timpul se obține accelerația momentană și valoarea maximă a acesteia:

$$a = dv / dt = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega \cdot t \quad \text{și} \quad a_{\max} = -A \cdot \omega^2 = -\omega \cdot v_{\max}, \quad (3.8)$$

Forța care determină mișcarea oscilatorie armonică trebuie să fie:

$$F = m \cdot a_{\max} = -m \cdot \omega^2 \cdot x = -k \cdot x, \quad (3.9)$$

relație în care  $x$  = valoarea deplasării particulei din poziția de echilibru.

Energia totală a unui astfel de sistem mecanic în oscilație forțată, de amplitudine  $A$  și pulsație  $\omega$ , variază periodic și este suma energiilor cinetice și potențiale a sistemului:

$$E_t = E_c + E_p = m \cdot \omega^2 \cdot A^2 / 2, \quad \text{cu} \quad \begin{aligned} E_c &= m \cdot v^2 / 2 = (m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2 \omega t) / 2, \\ E_p &= k \cdot x^2 / 2 = (m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \sin^2 \omega t) / 2. \end{aligned} \quad (3.10), (3.11)$$

Amplitudinea oscilațiilor variază în timp după o lege exponențială de forma:

$$A = A_0 \cdot e^{-\delta t}, \quad (3.12)$$

unde  $\delta$  este coeficientul de amortizare, o funcție de proprietățile elasto-plastice ale mediului.

După cum s-a menționat anterior, interacțiunea complexă dintre particulele mediului determină manifestarea fenomenului de rezonanță, când amplitudinea oscilațiilor forțate rămâne constantă ca și valoare și atinge un maxim la o frecvență a forței aplicate, denumită frecvență de rezonanță, care satisface relația:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad \text{unde } \omega_0 = \text{frecvența de rezonanță a sistemului, [rad/s]}. \quad (3.13)$$

Amplitudinea maximă la rezonanță este, figura 3.3 :

$$A_r = \frac{F_0}{m} \cdot \left( 2\delta \cdot \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \right), \quad m = \text{masa volumului infinitezimal supus oscilației}. \quad (3.14)$$

Modul de comportare la rezonanță a unui sistem oscilatoriu poate fi caracterizat de factorul de calitate  $Q$  definit astfel:

$$Q = \omega_r \cdot m / r = \pi \cdot f_r / \delta, \quad (3.15)$$

unde  $r$  = factorul de proporționalitate pentru rezistența mecanică a mediului;

$f_r$  = frecvența de rezonanță a sistemului, [Hz].

sau, conform notațiilor din figura 3.3:  $Q = f_r / (f_1 - f_2) = \omega_r / (\omega_1 - \omega_2)$ , (3.16)

Cu cât valoarea lui  $r$  este mai mică (coeficientul de amortizare este mai mic) valoarea factorului de calitate este mai mare și ca urmare curba de rezonanță este mai ascuțită (diferența " $f_2 - f_1$ " se reduce) și amplitudinea de rezonanță este mai mare.

Deloc de neglijat în aplicațiile practice este alunecarea de frecvență, fenomen a cărui cauză este tocmai amortizarea introdusă în sistem. Aceasta modifică caracteristicile mecano-dinamice ale sistemului rezonant, figura 3.4, determinând deplasarea curbei de rezonanță și pentru menținerea sistemului în regim de rezonanță se impune ajustarea frecvenței semnalului generatorului,  $f_\sigma$ , astfel încât  $f_1' < f_\sigma < f_2'$ , figura 3.3.

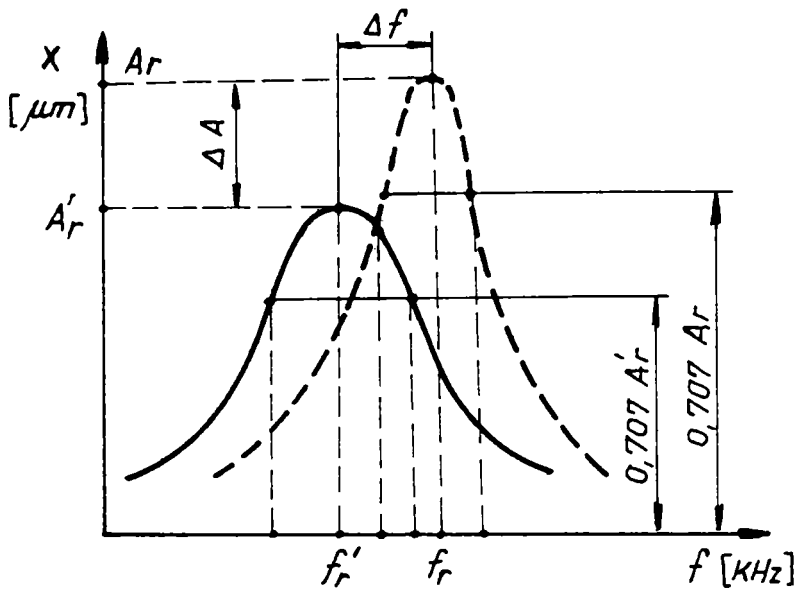


Figura 3.3 Curba de rezonanță

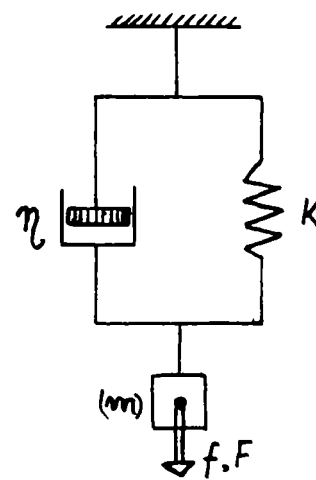


Figura 3.4 Sistem mecanic echivalent pentru ansamblul ultrasonic (Kuttruff [70])

Apariția unui maxim a amplitudinilor forțate – fenomenul de rezonanță – are o importanță deosebită deoarece dacă lipsește amortizarea în sistem, în cazul manifestării unui comportament elastic ideal,  $\delta = 0$ , al mediului de propagare, frecvența forței aplicate este egală cu frecvența oscilațiilor proprii și, teoretic, amplitudinea oscilațiilor precum și energia transmisă mediului devin infinite.

În realitate, există limitări ale valorilor acestor elemente caracteristice ca urmare a amortizărilor din sistem motiv pentru care, la proiectarea sistemului electroacustic în concordanță cu cerințele aplicației practice, prezintă interes raportul dintre amplitudinea oscilațiilor transductorului,  $A_T$ , și valoarea ei admisibilă,  $A_{adm}$ , la frecvența de rezonanță:

$$K_{adm} = \frac{A_T}{A_{adm}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2 \cdot \Delta f_{adm} \cdot Q / f_T)^2}}, \quad (3.17)$$

unde  $Q$  = factorul de calitate al sistemului ultrasonic;

$\Delta f_{adm}$  = valoarea minimă a abaterii de la frecvența de rezonanță ce poate fi acceptată ținând seama de performanțele generatorului sau de comportarea sistemului la rezonanță ( diferența  $f_2' - f_1'$  );

$f_T$  = frecvența nominală de rezonanță a sistemului ultrasonic.

Contactul concentrator mediu de prelucrare este mai mult sau mai puțin ferm, situat între contactul minim -care asigură transferul și localizarea energiei de procesare la un nivel ridicat- și contactul maxim care, deși introduce o amortizare substanțială, diminuarea amplitudinii de rezonanță și a energiei ultrasonice în zona de lucru, trebuie să permită funcționarea sistemului în limite acceptabile de eficiență. Dintre factorii perturbatori, care determina diminuarea amplitudinii de rezonanță și aplatizarea curbei "clopot" a frecvenței de rezonanță, figura 3.3, menționați de literatura de specialitate amintim: forma și dimensiunile concentratorului, masa sculei, forța axială de apăsare din proces.

Trebuie menționat faptul că desemnarea "forte axiale din proces" ca factor de influență s-a făcut cu referire strict legată de situația aplicațiilor clasice ale activării ultrasonice la care suprafața frontală a concentratorului este singura implicată în procesarea mediului activat.

În cazul particular al activării ultrasonice a topiturilor de polimer, concentratorul de unda este, practic, imersat în mediul de activat, sub presiune, situație care impune luarea în considerare a unor efecte colaterale ale presiunii după normala la suprafață, dezvoltate la nivelul suprafeței laterale a acestuia.

Unul dintre obiectivele acestei teze este punerea în evidență a unor astfel de efecte prezumtive și cuantificarea lor în raport cu efectele clasice ale activării ultrasonice, manifestate la nivelul suprafeței frontale a concentratorului.

Amortizarea reală din sistem este practic elementul de care nu ține seama nici una din metodele de dimensionare cunoscute, Iclănzan [64]. Aceasta determină scăderea amplitudinii de vibrație a sculei, modificări ale frecvenței de rezonanță și ale modului de vibrație a sistemului oscilant.

Oscilațiile armonice întretinute sunt produse de un echipament specific, figura 3.5a, care transformă energia electrică de frecvență ultrasonică în energie mecanică de aceeași frecvență și o concentrează în spațiul de lucru.

### 3.3. Sistemul pentru activarea cu ultrasunete.

În prezent, pentru aplicații industriale se folosește o gamă variată de instalații pentru producerea ultrasunetelor. În funcție de energia primară utilizată, acestea se diferențiază în două categorii:

- instalații mecanice, la care energia primară utilizată este energia mecanică;
- instalații electroacustice, la care energia primară folosită pentru producerea vibrațiilor este energia electrică.

Instalațiile electroacustice, a căror elemente sunt prezentate în schema din figura 3.5a, sunt preferate celor mecanice datorită multiplelor avantaje pe care le prezintă (fiabilitate, eficiență sporită, mentenanță facilă) având, ca atare, o mai largă răspândire.

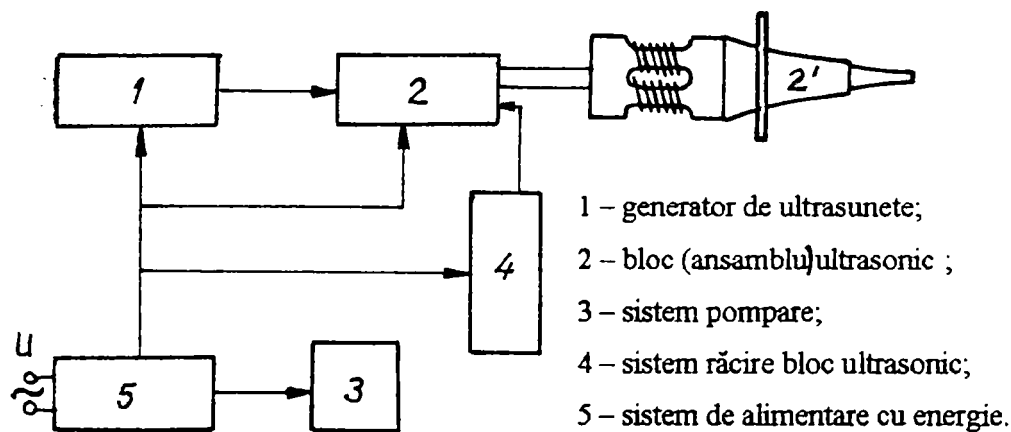


Figura 3.5 Sistemul pentru activarea cu ultrasunete

#### 3.3.1. Generatorul de ultrasunete

Generatorul de ultrasunete este o sursă de energie primară și este o construcție electronică concepută a funcționa:

- fie pe principiul generării și amplificării de semnal sinusoidal,
- fie pe principiul comutației

astfel încât, pe baza energiei electrice absorbite generează la ieșire tensiune sau curent de intensități mari la frecvențe stabile de oscilație ultrasonică. Din punct de vedere al posibilităților de variație a parametrilor semnalului de ieșire, generatoarele de ultrasunete pot fi:

- de frecvență nominală fixă, având totuși posibilitate de semireglaj a frecvenței într-o plajă îngustă de valori pentru compensarea alunecării de frecvență și acordarea pe



frecvența de rezonanță a convertorului. Gama de aplicații posibile este limitată ; se pot folosi convertoare care au frecvență de rezonanță apropiată de frecvența nominală de lucru a generatorului;

- de frecvență variabilă, cu posibilitatea de reglaj a frecvenței într-o plajă largă de valori, acoperitoare pentru o gamă variată de aplicații.

În echipamentele ultrasonice industriale se utilizează, de obicei, generatoare cu reglare automată a frecvenței pe frecvența de rezonanță a transductorului.

Reglajul automat al frecvenței trebuie să asigure o cât mai bună apropiere a frecvenței generatorului,  $f_G$ , de frecvența de rezonanță a transductorului,  $f_{Tr}$ , iar diferența dintre acestea,  $\Delta f_{regl.aut}$ , să nu scoată din rezonanța sistemul acustic, figura 3.3:

$$\Delta f_{regl.aut} < f_1 - f_2$$

### 3.3.2. Blocul sonic (convertorul). Soluții constructive și performante

Ansamblul blocului sonic are rolul de a transforma oscilațiile de frecvență ultraacustică în oscilații mecanice amplificate la o anumită valoare care se transmit apoi mai departe sculei de prelucrare sau mediului de activat. Un astfel de convertor, ce reprezintă elementul principal al sistemului ultrasonic, și modul de variație a amplitudinii unde ce-l parcurge, este prezentat în figura 3.6 și se compune din:

1. transductorul magnetostrictiv sau piezoelectric;
2. concentrator.

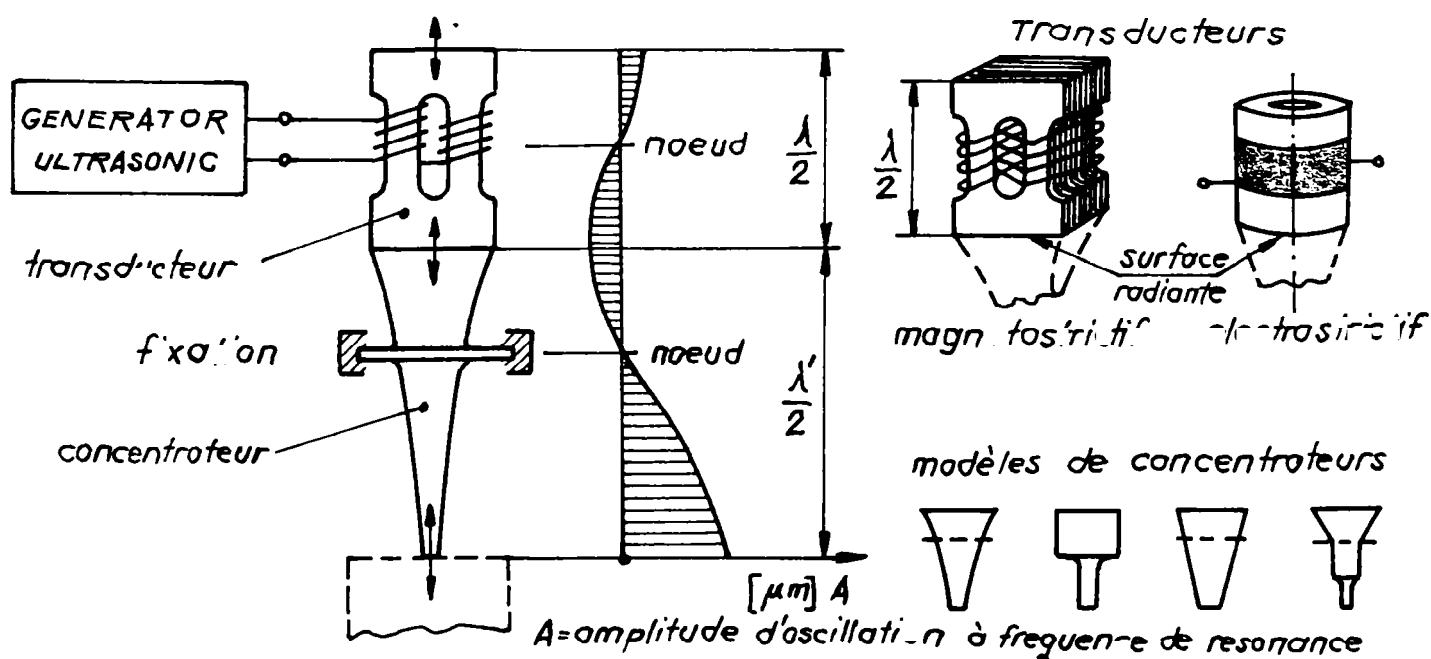


Figura 3.6 Blocul sonic (Iclănzan [66])

### 3.3.2.1 Transductori

Aceste elemente componente ale blocului ultrasonic realizează o conversie de energie având rolul de a transforma oscilațiile electrice de frecvență ultrasonoră în oscilații mecanice de aceeași frecvență. Transductoarele pot fi, figura 3.6, :

- magnetostrictive, a căror utilizare se bazează pe fenomenul magnetostrictiv direct (efect Joule). Aceste materiale, introduse într-un câmp magnetic variabil, își modifică dimensiunea ( $\Delta L$  de ordinul micrometrilor) datorită rearanjării momentelor magnetice ale domeniilor sub acțiunea unui câmp magnetic extern;
- piezoelectrice care, pe baza efectului piezoelectric invers (sarcina electrică  $Q \rightarrow F$ , forța dezvoltată), prin interacțiunea câmpului exterior cu momentele electrice bipolare ale cristalului, datorită deplasării ionilor în volumul acestuia, își modifică grosimea funcție de sarcina electrică aplicată pe fețele paralele ale plachetei piezoelectrice.

Eficacitatea transductorului este dată de factorul de cuplaj electromecanic :

$$k = \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} \cdot 100, \quad [\%], \quad (3.18)$$

iar randamentul sau factorul de conversie electroacustică va fi dat de relația:

$$\eta = \frac{E_m}{E_p} = k^2, \quad [\%], \quad (3.19)$$

relații în care  $E_m$  = energia mecanică produsă,  $E_p$  = energia primită de la generatorul de semnal,  $E_p = \frac{1}{2} C \cdot U^2$  pentru transductoare piezoceramice și  $E_p = \frac{1}{2} L \cdot i^2$  pentru transductoare magnetostrictive.

### 3.3.2.2 Materiale pentru transductoare magnetostrictive

Materialele ce manifestă efectul Joule în prezența unui câmp magnetic variabil sunt diferențiate în trei categorii

- a. materiale feromagnetice pure: nichel (Ni), cobalt (Co), fier (Fe);
- b. aliaje: permendur (49% Co + 49% Fe + Va)  
alfer (86% Fe + Al);  
permalloy 45 (45% Ni + Fe)  
supermalloy (66% Ni + Fe)
- c. ferite = combinații de  $Fe_2O_3$  cu  $NiO_{1/2}$  sau  $ZnO_{1/2}$

După cum rezultă din figura 3.7 permendurul și alferul prezintă calități magnetostrictive superioare celorlalte materiale însă, la alegerea tipului de transductor magnetostrictiv trebuie avute în vedere criteriile ca: fiabilitate, cost transductor, facilități de exploatare (răcire, întreținere, cuplajul mecanic cu concentratorul).

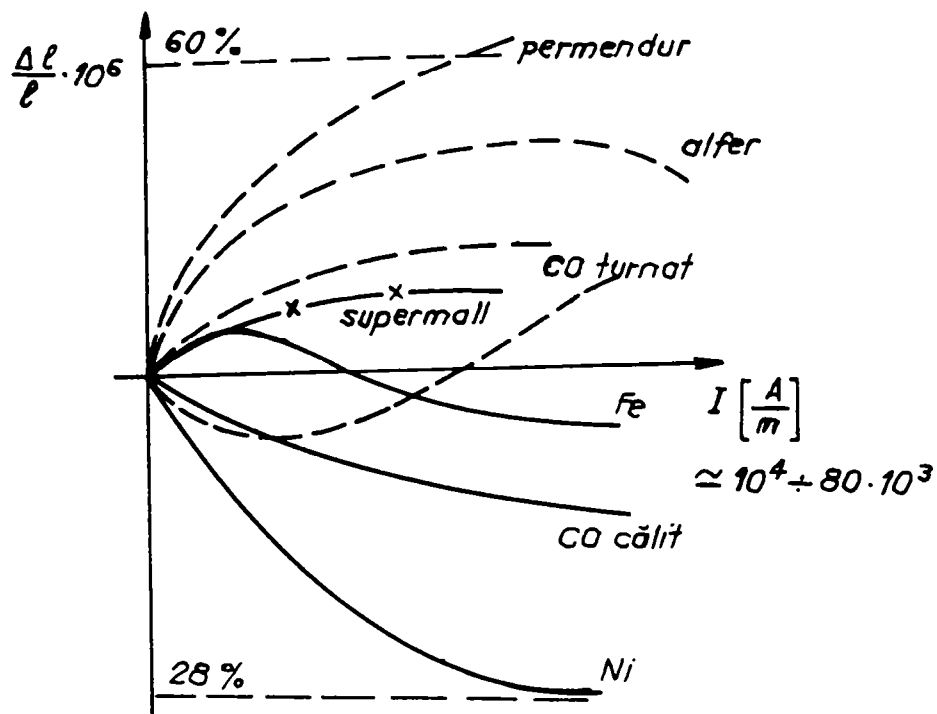


Figura 3.7 Efectul Joule pentru diferite materiale magnetostrictive (Kuttruff [70])

Pentru un câmp magnetic variabil, de frecvența  $\gamma_0$ , într-o perioadă sensul câmpului magnetic se schimbă de două ori, frecvența de variație a dimensiunilor acestuia va fi  $\gamma = 2 \cdot \gamma_0$ . Pentru a evita aceasta dedublare de frecvență și pentru a mări amplitudinea respectiv intensitatea activării ultrasonice, peste câmpul magnetic de polarizare se suprapune un câmp magnetic continuu, de premagnetizare, de valoare puțin superioară valorii eficace a câmpului magnetic variabil.

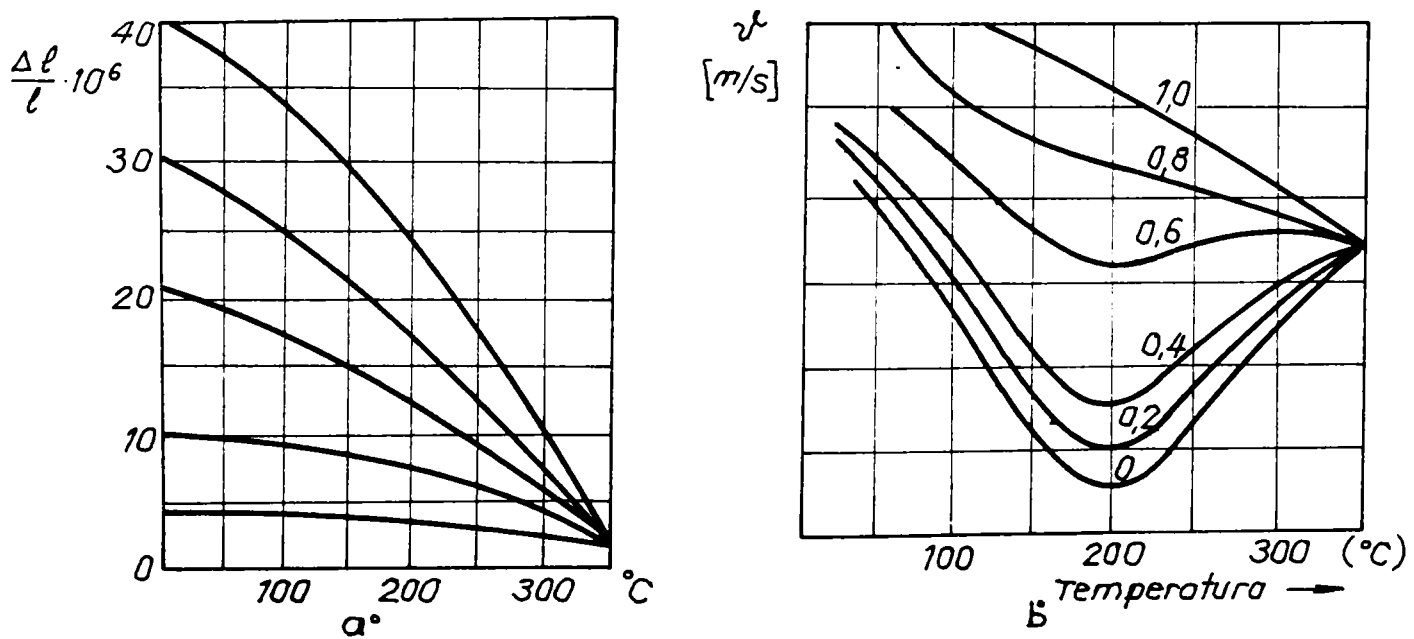


Figura 3.8 Influența temperaturii asupra proprietăților materialelor magnetostrictive

Toate materialele magnetostrictive sunt sensibile la temperatura, materialul pierzând magnetismul său pe măsură ce temperatura crește, pînă ce se atinge punctul "Curie" unde încetează orice proprietate magnetica. In figura 3.8a se arată efectul de temperatura asupra coeficientului de magnetostrictiune pentru nichel, iar în figura 3.8b se arată pentru același metal variația vitezei sunetului funcție de temperatura.

Trebuie remarcat însă ca deși feritele sunt tratate mai puțin in literatura de specialitate, acestea încep sa fie folosite din ce in ce mai mult pentru transductoarele de putere medie, datorită avantajelor pe care le prezinta în raport cu celelalte materiale magnetostrictive.

### Transductori cu ferita

In comparatie cu alte materiale magnetostrictive transductoarele feritice prezintă unele avantaje care le fac apte pentru a fi folosite la puteri medii de excitare a generatorilor de frecvență și anume:

- factor de transformare electroacustic relativ mare, pierderile datorită curenților turbionari sînt foarte mici (dacă ferita este de buna calitate);
- punct Curie înalt;
- pret de cost relativ scăzut față de celelalte materiale magnetostrictive enumerate anterior;
- se poate realiza răcirea cu apa, în contact direct;
- robustețe în exploatare.

In literatura de specialitate se indica unele tipuri de ferita folosite la constructia transductorilor magnetostrictivi: Ni-Cu; Ni-Cu-Co; Ni-Cu-Co-Mn; Ni-V; Ni-Cu-V; Ni-Cu-V-Co; Ni-Cu-W; Ni-Cr; Ni-Cu-Zn-Cd; Ni-Li; s.a. In ANEXA 3, se prezinta caracteristica unor tipuri de ferita folosite în constructia transductorilor magnetostrictivi de putere mica si medie.

O problema însemnată în folosirea feritelor ca transductori magnetostrictivi este limita de încărcare a acestora, mărime caracteristică ce este determinată de rezistența mecanică a materialului sollicitat alternativ, atât la tracțiune cît și la compresie.

Însă trebuie ținut seama și de variația parametrilor functionali cu temperatura - variație ce duce la un dezacord între transductor și sarcina generatorului de oscilatie ultraacustica. Dacă o variație a frecvenței de rezonanță aduce o ușoara reducere a randamentului electroacustic potențial, o variație a impedanței în acest caz, va creea o scădere importantă a puterii aplicate de la generatorul de oscilații ultrasonore la transductorului magnetostrictiv construit din ferita .

Din acest motiv trebuie acordată o importanță deosebita răcirii blocului sonic, astfel ca acesta să lucreze la o temperatura sub valoarea critica. Totodata este necesar a folosi ferite cu un

coeficient de temperatura redus, chiar dacã în acest fel se reduc într-o oarecare mãsurã alte performante ale transductorului magnetostrictiv.

Deoarece transductoarele folosite în echipamente ultrasonice destinate prelucrãrii dimensionale, sudãrii diferitelor materiale sau activãrii unor medii lichide trebuie sã fie robuste, având de suportat eforturi mecanice sau termice mari sunt de preferat transductoarele magnetostrictive care sunt capabile sã suporte asemenea solicitãri termice sau mecanice fãrã a le fi afectat funcionalitatea și au puteri admisibile aplicate ale oscilațiilor electromagnetice de valori relativ mari.

Varianta constructiva cea mai des întâlnitã în aplicațiile industriale ale feritelor magnetostrictive este tipul dreptunghiular care are avantajul robusteții mecanice și al simplitãții tehnologiei de fabricare.

### 3.3.2.3 Materiale pentru transductoare piezoelectrice

Utilizarea acestor materiale, monocristaline, necesitã cunoașterea orientãrii celor trei axe specifice: opticã, electricã, mecanicã astfel încât debitarea la cota "d", figura 3.9a, sã se facã dupã axa electricã și necesitã depunerea pe fețele paralele ale plachetei a unui strat fin de argint, prin care se realizeaza polarizarea cu semnalul electric primit de la generatorul de ultrasunete.

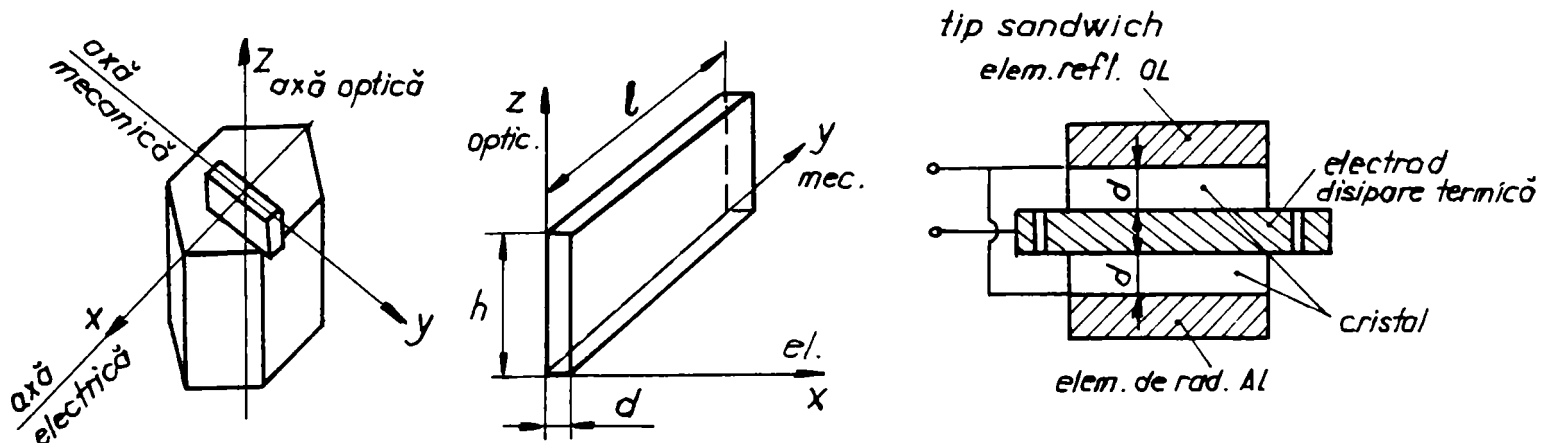


Figura 3.9 Cristal piezoelectric. Mod de debitare și utilizare

Pentru o dimensionare în  $\lambda/4$ ,  $d = \lambda/4 = C_1/4 \cdot \gamma_0$ ,  $d_1 = \lambda_1/4 = C_2/4 \cdot \gamma_0$ ,  $d_2 = d_1 + d_2$ , (3.20)

frecvența de rezonanță  $\gamma_0 = \frac{1}{2d} \cdot \sqrt{\frac{M_{x,i}}{\rho}} = 20 \dots 3000 \text{ kHz}$ ,  $C_i = \left(\frac{M_{x,i}}{\rho_i}\right)^{1/2}$ ,  $i = 1, 2$  (3.21)

$C_i$ ,  $M_{x,i}$  fiind viteza de propagare a undei ultrasonice și modulele de elasticitate Young după axa X pentru cuarț (indice 1), respectiv materialul plãcii de radiație (indice 2).

Tabel 3.1

Material	Punct Curie	Debitare cristal
cuarț	374° C	după axa X
sare Rochelle	24° C	45° în raport cu axa X

Materialele din tabelul 3.1, care manifestă efectul piezoelectric în condițiile unei încărcări electrice, precum și zaharul, turmalina, fosfatul monopotasnic ( $\text{KN}_2\text{PO}_4$ ), și fosfatul amoniacal (KDP), sunt caracterizate, de asemenea, de o temperatură începând de la care se pierd proprietățile piezoelectrice (punct Curie). Ținând seama de această valoare critică precum și de faptul că majoritatea dintre ele au o slabă rezistență mecanică sau se deshidratează în condiții de umiditate redusă (< 35%) cuarțul ( $M_x = 8,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $M_y = 7,87 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ) este preferat ca material pentru confecționarea transducoarelor piezoelectrice de uz industrial.

Recent, pentru confecționarea transducoarelor piezoelectrice s-au impus materialele ceramice:

- titanat de bariu ( $\text{BaTiO}_3$ ), punct Curie = 125° C;
- $\text{TiO}_2 + \text{BaCO}_3 + \text{liant}$ , punct Curie = 1200 ... 1500° C;
- niobat de bariu (PZT), punct Curie = 250° C

care, datorită tehnologiei de realizare (turnare în forma, răcire lentă cu  $v_r \approx 2^\circ \text{ C/h}$  în câmp electrostatic constant de  $10^6 \text{ V/m}$  pentru orientarea magnetică a domeniilor), permit utilizarea lor într-o largă gamă de forme și dimensiuni cu condiția respectării, în exploatare, a polarității indicate pe transductor.

În literatura de specialitate este tratată teoria proiectării transducoarelor magnetostrictive sau piezoelectrice, se analizează analitic detaliile formei și a procedeele constructive însă, în prospecte comerciale și publicații de specialitate se precizează doar performanțele acestora și dimensiunile caracteristice, ANEXA 3, informații care prezintă utilitate practică în aplicațiile industriale.

În tabelul 2 din ANEXA 3 se face o evaluare a performanțelor acestor materiale și se prezintă caracteristicile tehnice ale unor materiale folosite în mod tradițional la fabricarea transducoarelor ultrasonice de către firmele de specialitate. La selectarea materialului pentru confecționarea transducoarelor trebuie avut în vedere ca acesta:

- să nu fie pretentios din punct de vedere al compoziției și tehnologiei de fabricație;
- să aibă un preț de cost redus;
- să asigure o bună fiabilitate în exploatare.

#### 3.3.2.4 Concentratorul

Intr-un ansamblu transductor-concentrator-scula, rolul concentratorului este acela de element de legătură între transductor și mediul de activat respectiv între transductor și scula folosită la prelucrarea dimensională sau sudura cu ultrasunete, de a mări amplitudinea oscilațiilor unde ultrasonice precum și de a realiza o adaptare a generatorului de oscilații ultraacustice cu sarcina complexă a acestuia .

Tipuri de concentratoare .

In literatura de specialitate se semnalează mai multe tipuri de concentratoare, figura 3.6, folosite în echipamentele ultrasonice industriale. Acestea pot avea următoarele forme geometrice:

- bare cu secțiune constantă ;
- exponențial cu secțiune circulară ;
- exponențial cu secțiune dreptunghiulară ;
- cilindrice complexe (cu cavitate interioară sau în trepte).

Oricare ar fi tipul de concentrator de unda, dimensionarea lui se face adoptând fie metode matematice, laborioase mai ales în precizarea condițiilor de integrare, fie recurgând nomograme și la utilizarea unor relații ingineresti simplificate și expeditiv, ANEXA 3 , fie prin aplicarea metodei finite și utilizarea calculatorului în proiectare. Cu toate acestea, datele de încercare în exploatare arată ca îmbunătățirea performanțelor, respectiv al randamentului sistemului convertor rezonant, este deseori sub așteptări în raport cu complexitatea metodei, ba mai mult diferențele de performanță între metodele laborioase și cele simplificate sunt nesemnificative (diferențe de amplitudine de vibrație între 12 și 20%). Aceasta situație se poate datora următoarelor cauze:

- proiectarea concentratoarelor are în vedere un element oscilant separat (tip bara) însoțită de numeroase ipoteze simplificatoare (Amza [6], Bădărău [10], Drăgan [42], Kuttruff [70], Rozenberg [104]);

- precizarea condițiilor de integrare chiar și când sunt dintre cele mai complexe se referă tot la un element oscilant izolat și în foarte mică măsură se ia în considerare funcționalitatea globală a sistemului rezonant transductor-concentrator-sculă cu raportare la tehnologii specifice; încărcarea statică a concentratorului determină o alunecare a frecvenței de rezonanță a acestuia și un dezacord în raport cu frecvența de rezonanță a transductorului;

- există tendința de a aprecia existența unui concentrator doar din punct de vedere al efectelor tehnice (amplificarea vibrației și nivelul tensiunii maxime) ceea ce conduce la creșterea cheltuielilor de proiectare, execuție și chiar exploatare deseori în discordanță cu necesitățile reale din proces.

Un element esențial în proiectarea concentratoarelor de unda îl constituie viteza sunetului în materialul concentratorului, tabelul 4, ANEXA 3. Funcție de aceasta se stabilesc dimensiunile longitudinale ale concentratorului. Deoarece adaptarea vitezei longitudinale de propagare a undelor ultrasonice pe baza literaturii de specialitate este neconvingătoare și nerecomandabilă, (neconvingătoare, având în vedere determinările cu rezultate uneori diferite la același material și nerecomandabilă având în vedere diferențele de multe ori sensibile (determinate de calitatea reală a materialului, forma și dimensiunile concentratorului), în lipsa unei determinări prealabile precise pe semifabricat, se recomandă realizarea concentratoarelor la dimensiunile de proiectare  $[L, D, d, D(x)]$  utilizând viteza  $C_L$  de propagare longitudinală a unei ultrasonice recomandată din literatura și, de asemenea a se prevedea adaosuri de ajustare la cele două capete. În această situație fie se recurge la o instalație specializată de tipul "analizoarelor de concentratoare" (Horn Analyser system K20-Branson) fie se realizează la fabricant un montaj de măsurare a frecvenței reale în condiții de încărcare statică.

Montajul are la bază excitarea concentratorului realizat (cu adaosuri de ajustare) printr-un vibrator electromecanic pilotat de un generator de frecvență RC, și analiza semnalului captat de traductorul accelerometric din capătul opus al concentratorului. Acest montaj permite nu atât găsirea vitezei reale  $C_L$  de deplasare longitudinală a unei ultrasonice prin materialul concentratorului care este un ghid de undă ci, pe bază de ajustări, acordarea frecvenței de rezonanță a concentratorului cu cea a transductorului.

Având în vedere aceste considerente, de proiectare și acordare a frecvenței, și dificultățile inerente ce apar în proiectarea elementelor concentratoare de unda precum și faptul că în cazul activării ultrasonice a procesării materialelor polimerice concentratorul ansamblului ultrasonic este liber de încărcări statice care ar putea modifica frecvența de rezonanță a sistemului și factorul de calitate prin amortizările introduse, considerăm că, pentru dimensionarea concentratorului - ghid de undă, algoritmul clasic ce se bazează pe formulele prezentate în ANEXA 3 oferă rezultate multumitoare pentru o bună exploatare a ansamblului ultrasonic.



### 3.4 Efecte posibile în cazul activării ultrasonice a materialelor polimerice plastificate, sub presiune

În urma studiului bibliografic, ținând seama de starea și proprietățile masei de polimer plastificat (vâscoelastic sau vâscos, funcție de temperatură, care prezintă atât caracteristici ale fluidelor cât și ale solidelor) în cazul activării ultrasonice a procesului de injectare a polimerilor se poate afirma că sunt previzibile următoarele efecte (Badarau [10], Dragan [42], Kuttruff [70], Rozenberg [104]) :

#### 3.4.1 Efectul de suprafață (efectul de reducere a frecării).

În timpul activării ultrasonice, viteza sculei poate să depășească viteza de deplasare a mediului activat. La suprafața de separare, vibrația determină o deplasare infimezimală (de ordinul micrometrilor) dar suficientă pentru a determina separarea suprafețelor prin înmuierea sau topirea asperităților sau prin ruperea grefărilor macromoleculelor pe suprafața de curgere. Tehnica limitată de investigare în vecinătatea suprafeței de curgere nu permite verificarea acestor ipoteze dar, luând debitul de curgere ca element de referință, se constată majorarea valorilor acestuia ca urmare a reducerii sau chiar anulării temporare a forței de frecare, figura 3.10, datorită reversării sensului vectorului frecare, reducerii coeficientului de frecare și anularii componentei ce se opune mișcării pe interfața formată de suprafața laterală a concentratorului și materialul plastificat.

Rezultatul este modificarea distribuției de viteză de curgere a fluidului, de la variația prezentată în figura 1.17a pentru curgerea prin canal cilindric cu secțiune inelară, la cea din figura 1.17b (canal cilindric cu secțiune inelară cu partea centrală în mișcare), în sensul creșterii debitului volumic prin provocarea alunecării la perete.

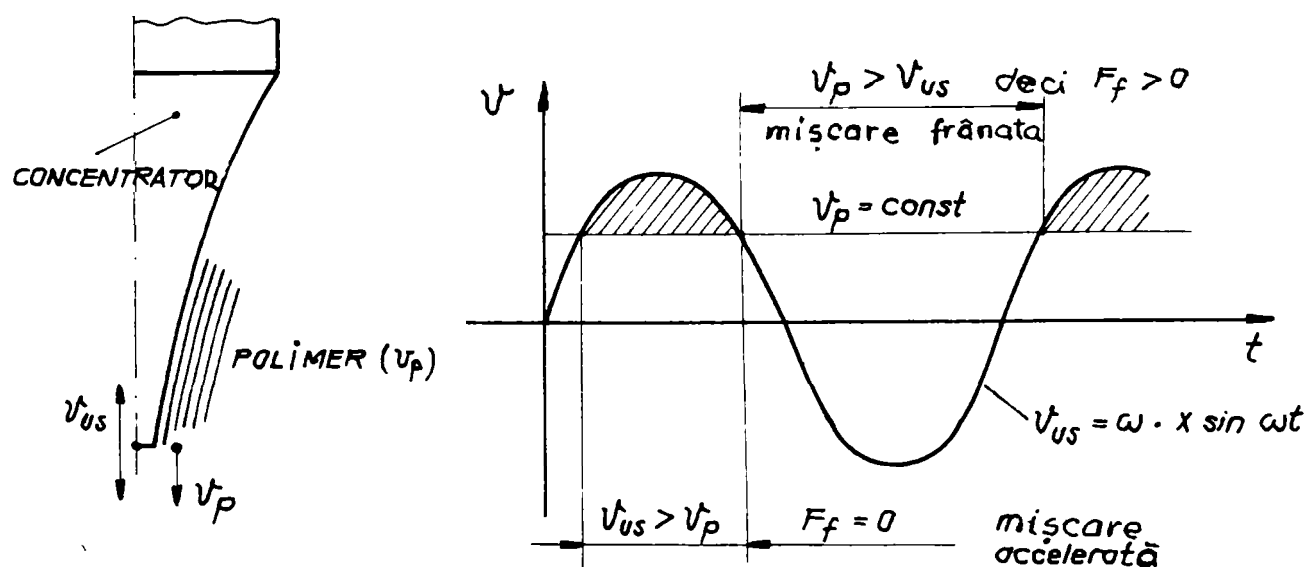


Fig. 3.10 Efectul de reducere a frecării

Viteza medie de deplasare a topiturii (de extrudare) crește și se reduce astfel vâscozitatea aparentă fără aport suplimentar de energie termică.

### 3.4.2 Inmuierea acustică (reducerea vâscozității datorită tensiunilor tangențiale induse)

În timpul propagării ultrasunetelor în medii solide, acestea interacționează activ cu materia producând tensiuni acustice și deformări elastoplastice; se crează în material componente ale tensiunii tangențiale suficient de mari pentru a dezancora dizlocațiile din pozițiile lor blocate de obstacole și de a favoriza deplasarea lor prin cristale sub influența vibrațiilor de înaltă frecvență. Se poate concluziona că energia ultrasonică este absorbită preferențial de către zonele imperfecte ale volumului activat (teoria Langenecker), Drăgan, [42] Rozenberg [105], energia ultraacustică având aceleași efecte de reducere a tensiunii statice de deformare ca și energia termică.

În cazul topiturilor de polimeri, pentru o topire incompletă (stare posibilă a materialului în vecinătatea punctului de injectare),  $T_v < T < T_{cus}$ , în materialul plastifiat sunt prezenți germeni de cristalizare sau mici cristalite înconjurate de material topit, amorf (figura 3.11):

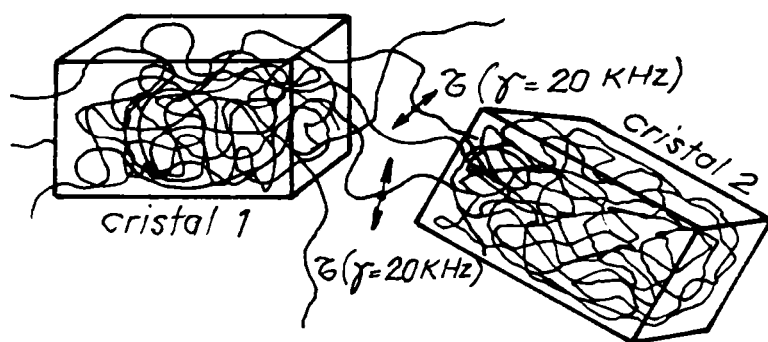


Figura 3.11 Reducerea vâscozității datorită tensiunilor tangențiale induse .

Dacă pentru materiale metalice este valabilă teoria dezancorării dizlocațiilor din pozițiile lor blocate datorită tensiunilor tangențiale provocate de unda ultrasonică, în cazul unui polimer semicristalin este de așteptat o creștere a temperaturii materialului amorf intercristalin, ca zona preferențială de conversie a energiei undei în energie termică, sau

chiar rupere macromoleculi datorită solicitării ciclice la care este supusă, fapt ce determină creșterea mobilității lanțurilor macromoleculare de material amorf prin favorizarea relaxării acestora și reducerea vâscozității aparente datorită tensiunilor tangențiale induse sau fragmentării lanțului polimeric. Se reduce astfel tensiunea superficială la limita de separare a fazelor lichid - solid (cristalit).

**Important:** la puteri de activare ridicate materialul polimeric poate suferi degradări importante datorită ruperilor lanțurilor macromoleculare.

### 3.4.3 Absorbția energiei undei ultrasonice și transformarea unei fracțiuni a acesteia în energie termică

Volumul topiturii supus activării ultrasonice este constituit dintr-o multitudine de macromolecule întrepătrunse între care apar, inerent, constrângeri reciproce de mobilitate care determina comportamentul vâscos al materiei. Ca urmare a acestei situații, amortizarea amplitudinii, odată cu îndepărtarea de sursa de oscilație, este provocată de manifestarea frecării interne în mediul de propagare și de conductivitatea sa termică.

Stokes explică absorbția undei ultrasonice prin influența vâscozității mediului. Formula Stokes pentru calculul coeficientului de absorbție este:

$$\alpha' = \frac{2\eta \cdot \omega^2}{3\rho \cdot C_L^3} = \frac{8\pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta}{3\rho \cdot C_L^3}, \quad (3.22)$$

Absorbția energiei ultrasonice depinde, de asemenea, de conductivitatea termică a mediului în care se propaga unda. Conform teoriei Kirckhoff, are loc un schimb de căldură între porțiuni de compresie și de destindere din unda, fapt ce duce la micșorarea energiei undei. În acest caz, coeficientul de absorbție, definit ca raport între energia absorbită / energia incidentă, este:

$$\alpha'' = \frac{2\pi^2 \cdot f^2}{\rho \cdot C_L^3} \cdot \frac{\chi - 1}{c_p} \cdot k_t, \quad (3.23)$$

Se definește un coeficient total de absorbție - teoria Stokes-Kirckhoff - care are expresia :

$$\alpha = \alpha' + \alpha'' = \frac{2\pi^2 \cdot f^2}{\rho \cdot C_L^3} \cdot \left( \frac{4}{3} \eta + \frac{\chi - 1}{c_p} \cdot k_t \right), \quad (3.24)$$

unde:  $\eta$  = coef. de vâscozitate;  $\rho$  = densitatea mediului,

$k_t$  = coeficient de conductivitate termică, mărime fizică diferențiată funcție de material;

$\chi = c_p/c_v$  este raportul căldurilor specifice la presiune constantă și la volum constant.

Căldura preluată de mediu prin absorbție are drept efect creșterea temperaturii acestuia în zonele de discontinuitate a mediului de propagare. Acest fenomen a constituit baza dezvoltării unor tehnici de asamblare a reperelor din materiale plastice prin activare ultrasonica.

În domeniul procesării materialelor polimerice, ca o aplicație cu totul particulară a fenomenului de conversie a energiei undei ultrasonice trebuie menționate experimentările realizate de Shin-Ichi Matsuoka [109]. Rezultatele acestor cercetări, care sunt o continuare a experimentelor realizate de Fairbanks [50], pun bazele unei noi tehnologii: punerea în formă prin presare

activata ultrasonic a pudrelor de materiale termoplastice si termorigide pentru producerea de reperate echivalente cu cele realizate prin punerea în formă a topituri de polimeri.

Pentru realizarea experimentelor s-a folosit o masina de sudare cu ultrasunete pe care s-a montat un dispozitiv de formare compus dintr-un cilindru și un piston de presare, figura 3.13 , atasat concentratorului unui ansamblu ultrasonic condițiile de experimentare fiind prezentate în tabelul 3.2

Tabel 3.2

Nr. crt.	Caracteristica	Nivel
1	Utilajul folosit pentru punerea in forma prin activare ultrasonica. Caracteristici de baza	3 kW, 15 kHz, Welder USWP-3000Z15S 5 kW, 15 kHz, Welder USWP-5000Z15S
2	Amplitudinea maxima a oscilatiei sculei, [ $\mu\text{m}$ ]	30 50 75 100 125 150
3	Frecventa de lucru, [kHz]	14,65 14,81 14,73 14,9 14,76 14,75
4	Tipul concentratorului	in trepte
5	Suprafata frontala a concentratorului	plana, finisata cu hartie abraziva (no. 320)
6	Material container si piston de presare/activare	otel laminat de uz general, SS 34
7	Dimensiunea produselor realizate	disc $\phi 50/6$ mm cilindru $\phi 17,5/15$ mm
8	Presiunea de compactare, [MPa]	0,5 1,0 1,5 2,0 2,5
9	Durata activarii ultrasonice, [s]	1 ... 100
10	Durata fazei de racire a produselor operatiei [s]	90
11	Materiale plastice supuse studiului	polietilena de înalta densitate (PEID) polipropilena (PP) poliamida, nylon (PA)
12	Masa esantionului de pudra supus presarii, [g]	1 3 5 7,5 10

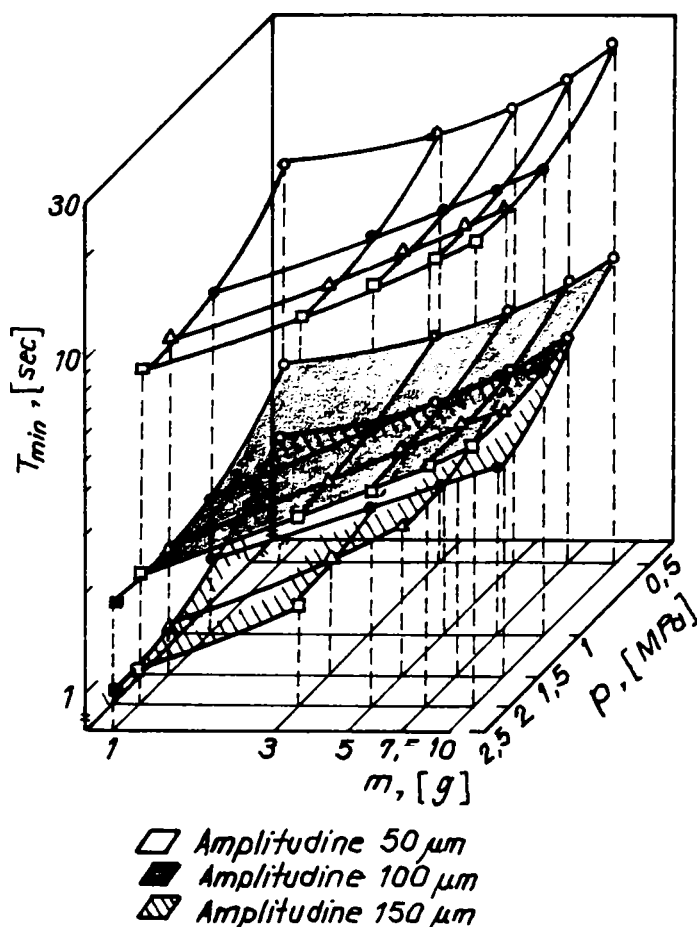


Figura 3.12 Durata minim necesară de activare ultrasonică pentru diferite condiții de lucru (Shin-Ichi Matsuoka [109])

Pentru mai multe valori de amplitudine ale activării, presiune de compactare, volum de material supus presării, s-a urmărit a se determina durata minimă de presare pentru realizarea de reperate izotrope, a căror volum de material a fost supus, în întregime activării ultrasonice. Reprezentarea tridimensională sintetică a rezultatelor este redată în figura 3.12 și pune în evidență existența unor suprafețe de durata minimă de activare diferențiate prin nivelul activării ultrasonice.

În urma analizării rezultatelor experimentale precum și a studiilor comparative privind eficiența, aplicabilitatea, structura și proprietățile reperelor

realizate prin tehnologia clasică, de punere în formă a topiturii, și prin presare activată ultrasonic (tabelul 3.3) conform concluziilor autorului se poate constata că:

1. produsele obținute prin compactare ultrasonică prezintă aceleași proprietăți mecanice ca și cele realizate prin injectare (testate în lungul fibrajului) față de care au, în plus, avantajul izotropiei;
2. durata minimă necesară de activare ultrasonică scade odată cu creșterea amplitudinii vibrației ultrasonice și a presiunii de compactare;
3. utilizarea pudrelor ca materie primă permite o gamă largă de combinații și ofera un nou domeniu de aplicabilitate: punerea în forma a compozitelor;
4. temperatura dezvoltată în timpul procesului de punere în forma prin presare activată ultrasonic este mică în raport cu valorile de temperatura atinse în timpul procesării prin procedee clasice. Erorile dimensionale generate de contracția materialului sunt, astfel, mult diminuate ceea ce recomandă acest procedeu de punere în formă pentru realizarea reperelor de precizie și/sau din materiale cu sensibilitate termică ridicată.
5. acest procedeu de punere în formă are dezavantajul limitării volumului de material procesat prin faptul că, pentru extinderea efectului activării ultrasonice la întreg volumul de pudră presată, este necesară depășirea unui prag al densității de energie ultrasonică.

Tabel 3.3

Indicator	Metoda de punere în formă	
	<i>presare activată ultrasonic</i>	<i>injectare clasică</i>
echipament și costul operației	gabarit mic, preț scăzut	gabarit mare, cost ridicat
complexitatea sculei	simplă, de mici dimensiuni	complexă, gabarit mare
eficiența economică	excelentă	excelentă
productivitate	favorabilă aplicării în prod. de masă	favorabilă aplicării în prod. de masă
sistem de încălzire/răcire	nu este necesar	necesar
eficiența energetică	excelentă	scăzută
temperatura de procesare	temperatura mediului ambiant	$T > T_{cu} = 125 \dots 280 \text{ } ^\circ\text{C}$
difficultatea operației	reducă	reglaje multiple și delicate
materiale posibil a fi prelucrate	orice tip, sub forma de pudre, fibre	gamă limitată
prelucrare de materiale compozite	posibilități nelimitate	gamă limitată în ceea ce privește aditivii
gamă dimensională de produse	gabariate relativ reduse, $\phi \approx 100 \text{ mm}$	nelimitată
proprietăți mecanice ale produsului		excelentă
precizia dimensională realizabilă		excelentă

#### Observație:

Trebuie, însă, remarcat faptul că activarea ultrasonică s-a realizat la nivele energetice mari, 15 kW, ceea ce nu este de dorit în cazul activării ultrasonice a curgerii topiturilor de polimeri caz în care se dorește ca sistemul ultrasonic să înlocuiască, parțial, dispozitivele clasice (termorezistive) de încălzire zonală a topiturii.

De asemenea, de un interes deosebit în ceea ce privește manifestarea efectelor specifice activării ultrasonice și profunzimea zonei afectate, sunt rezultatele încercărilor experimentale publicate de Fairbanks [50], ("Branson Sonic Power Co.", Danbury / Connecticut), aceste experimentări și cele ale lui Shin-Ichi Matsuoka fiind, după cunoștința noastră, singurele încercări de introducere a activării ultrasonice în procesarea materialelor plastice.

Conform articolului publicat în revista Ultrasonics, 12(1)/1974, sub titlul *Applying ultrasonics to the moulding of plastics powders*, cercetările experimentale au vizat determinarea grosimii stratului de material polimeric,  $y$ , afectat de activarea ultrasonică și posibilitatea extrudării materialului supus încercării fără a folosi o sursă de încălzire convențională și au permis stabilirea unor corelații  $y = F(U, P, T)$  pe baza acestora s-au calculat, prin regresie matematică, parametrii optimi pentru obținerea unei cantități maxime de material topit.

O gama larga de materiale termoplastice (acrilice, vinilice) și termorigide (fenolice, alilice), sub forma de pulberi (granule sferice  $\phi = 50 \dots 200 \mu\text{m}$ ) au fost topite, experimental, într-un cilindru metalic  $\Phi = 12 \text{ mm}$  prin activarea ultrasonica ( $\gamma = 20\text{Hz}$ ,  $P = 75 \dots 150 \text{ W}$ ) a pistonului ce presează materialul, figura 3.13, tabelul 3.4).

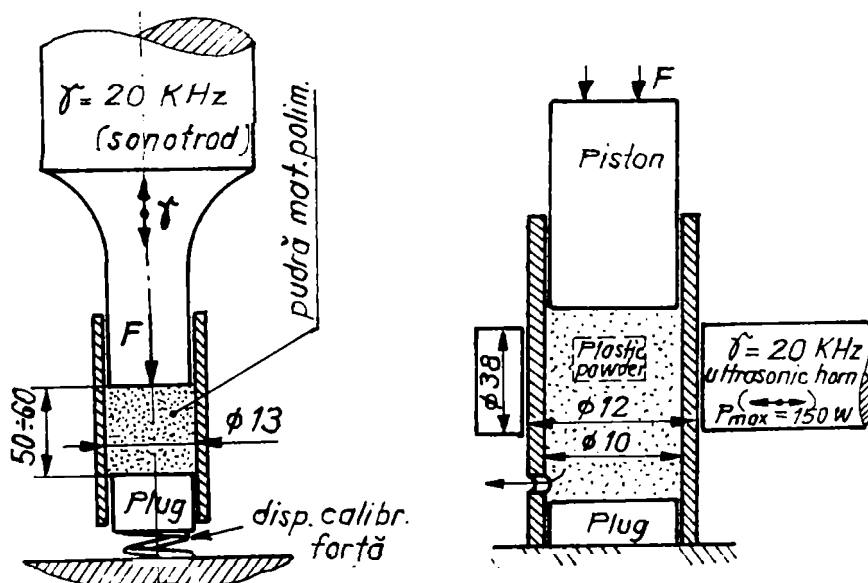


Figura 3.13. Dispozitiv experimental Branson Sonic

Condiții de experimentare:

Tabel 3.4

Variabile	Valoare variabile		
Intensitate ultrasonica $U$ , $[\text{W} / \text{cm}^2]$	23,5	35,5	47,5
Presiunea statica (de presare) $P$ , $[\text{kg} / \text{cm}^2]$ , presa hidraulica	0,7	1,4	2,1
Durata activarii ultrasonice, $T$ , [s]	15	30	45

**Regresii matematice stabilite pt. calculul adâncimii -y- a stratului de material topit, ca efect al presării activate US:**

*Pentru materiale termoplaste :*

$$y = 0,48 + 0,53 \cdot U + 0,23 \cdot P + 0,071 \cdot T + 0,031 \cdot U \cdot T + 0,018 \cdot U \cdot P - 0,031 \cdot P \cdot T + 0,020 \cdot U^2 + 0,033 \cdot P^2 + 0,007 \cdot T^2$$

*Pentru materiale termorigide :*

$$y = 0,63 + 0,132 \cdot U - 0,041 \cdot P + 0,061 \cdot T + 0,013 \cdot U \cdot T + 0,003 \cdot U \cdot P - 0,048 \cdot P \cdot T + 0,025 \cdot U^2 - 0,132 \cdot P^2 - 0,069 \cdot T^2$$

Pe baza acestora s-au determinat, prin calcul, parametrii optimi pentru obținerea unei valori maxime pentru cantitatea de material topit, tabel 3.5 :

Tabel 3.5

Parametrii (valori optime)	Termoplast	Termorigid
Intensitatea campului ultrasonic U [W/cm <sup>2</sup> ]	35,5	94,5
Presiunea statica (de presare) P [kg/cm <sup>2</sup> ]	0,5	1,2
Durata activării presării T [s]	65	40
Adâncimea max. de strat fizionat y [mm]	<b>8</b>	<b>10</b>

Concluziile autorului privind activarea ultrasonică a presării pulberilor de material polimeric sunt:

1. asigură energia necesară topirii pulberii, fără încălzire suplimentară;
2. determină, pentru aceleași rezultate, reducerea presiunii statice aplicate sistemului;
3. în cazul activării bilaterale, elimină linia de demarcație (de sudura, la trecerea în stare solidă) între cele două zone de material topit;
4. în cazul extrudării printr-un orificiu de diametru  $\phi = 1,5\text{mm}$ , nu numai că oferă energia termică pentru fuziune, reduce și rezistența (frecarea) materialului la trecerea prin orificiu de extrudare.

**Observatie:**

In ansamblu, concluziile formulate de Fairbanks vin în sprijinul aplicării activării ultrasonice în procesele ce implică curgerea topiturilor de polimer, la aceste aplicații efectele ce sunt vizate pentru îmbunătățirea performanțelor tehnologice fiind confirmate, parțial, prin rezultate experimentale.

Literatura de specialitate menționează și alte efecte posibile ale ultrasunetelor exploatare în aplicațiile industriale dar considerăm că, datorită condițiilor specifice de lucru:

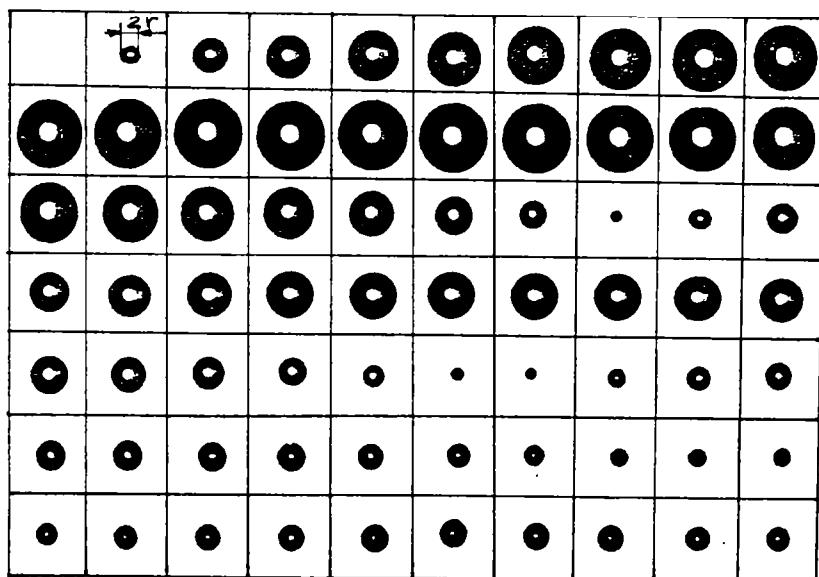
- presiune ridicată;
- materialul supus activării este degazat, uscat;
- topitura tranzitează zona activată într-un timp scurt

în cazul activării ultrasonice a procesului de injectare/extrudare a polimerilor este puțin probabilă manifestarea următoarelor efecte ale ultrasunetelor (Amza [6], Bădărău [10], Drăgan [42], Kuttruff [70], Rozenberg [104]):

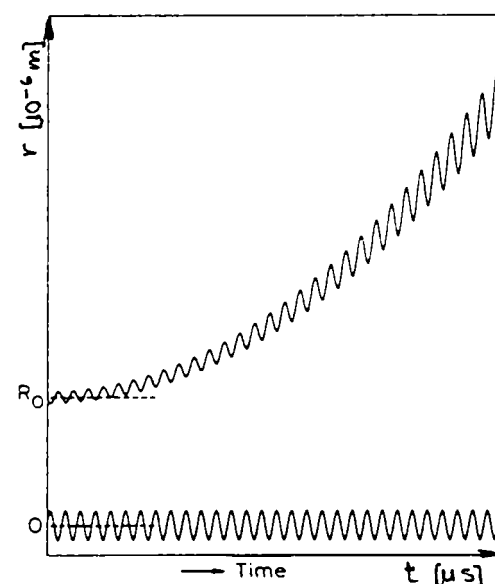
- **Cavitatie**, pentru că presupune o tranziție de fază lichid/gaz, stare gazoasă fiind imposibil de obținut pentru materiale polimerice industriale.

Ca urmare a unei variații rapide și bruste de presiune, distanța medie dintre particulele unei faze lichide variază urmărind modificările de presiune până la atingerea valorii necesare ruperii lichidului. În acest moment, presiunea acustică este negativă și anulează presiunea corespunzătoare forțelor de coeziune dintre particule determinând punerea mediului în stare gazoasă.

Apar astfel cavitati microscopice în punctele de slabă rezistență generate de neomogenități numite germeni sau nuclei de cavitatie. În continuare, sub acțiunea undelor ultrasonore, bula de cavitatie își mărește volumul ca urmare a generării continue de fază gazoasă până la atingerea unui moment critic când, printr-o comprimare adiabatică bruscă a vaporilor existenți în interiorul ei, se distruge rapid (implozie) și se generează o undă de șoc a cărei intensitate este corelată cu valoarea presiunii acustice, figura 3.14.



(fotografiere rapidă, 75000 cadre/s)



evoluția în timp a dimensiunilor  
bulei de cavitatie

Figura 3.14 Dezvoltarea bulei de cavitatie (Kuttruff [70])



Pe langa manifestarile mecanice, acustice si optice (sonoluminiscenta) se constata și prezența unor slabe emisii de radiatii ionizate și o crestere locala a temperaturii. S-au emis ipoteze conform cărora fenomenul de cavitate poate genera, în vecinătatea locului imploziei, temperaturi de ordinul  $10^3 \dots 10^4$  °C.

În cazul procedeelor de punere în forma a materialelor polimerice:

- conținutul de apă al topiturii activate ultrasonic este infim (granulele se uscă în cuptor electric 4-16 ore înainte de utilizare);
- presiunea materialului plastifiat este mare (50 - 1500 bari).

Tinând seama de mecanismul dezvoltării bulei de cavitație și de aceste condiții particulare de procesare a topiturii se poate considera că, cel puțin pentru nivele moderate de activare, este împiedicată producerea nucleilor și a bulelor de cavitație;

- **Polimerizare.** Mecanismul care stă la baza procesului de polimerizare nu este încă bine precizat. A fost dezvoltată ideea că acest fenomen se datorează apariției de radicali liberi în soluțiile de polimeri în care este prezenta apă. Disocierea moleculei de apă datorată cavitației acustice produce radicalii liberi care amorsează polimerizarea. Notabil este faptul că, pentru a obține efectul de polimerizare, timpii de iradiere sunt de ordinul a 30...40 de minute iar timpul de activare ultrasonică a unui volum de material topit, la trecerea lui prin duza de injectare sau capul de extrudare, este de maxim 10 secunde.
- **Depolimerizare.** La iradierea cu ultrasunete timp mai îndelungat, 1...6 ore, a unei soluții de nitroceluloza, acetat de polivinil sau polistiren s-a constatat reducerea ireversibilă a vâscozității acesteia. Polimerul nu mai revine la vâscozitatea inițială nici chiar după evaporarea solventului și nici printr-o nouă dizolvare. S-a produs, deci, scindarea legăturilor de valență a căror restabilire nu se poate realiza fără condiții speciale de reacție și fără catalizatori corespunzători.

Majoritatea cercetătorilor stabilesc că în procesul de depolimerizare în câmp ultrasonic, un rol important îi revine fenomenului de cavitație acustică stabilindu-se ca într-un lichid complet degazat sau aflat sub o anumită presiune depolimerizarea nu mai are loc.

- **Dispersia ultrasonica**, pentru ca fenomenul se manifestă la suprafața de separare dintre un mediu gazos și un alt mediu, lichid, activat ultrasonic, situație care nu se întâlnește în cazul activării ultrasonice a procedeelor de punere în formă a materialelor polimerice.

### 3.5 Concluzii

Este posibilă o activare ultrasonică a procesului de injecție a materialului polimeric în vecinătatea orificiului de intrare în cuib (punct de injecție al duzei finale de injecție) sau în secțiunea de ieșire din filiera de extrudare astfel încât, în aceasta zonă restrânsă să se realizeze o concentrare de energie ultrasonică. Materialul plastifiat beneficiază astfel de efectele specifice activării ultrasonice a căror manifestare poate fi folosită în scopul:

- corectării unor deficiențe funcționale ale dispozitivelor anterior menționate;
- controlului temperaturii în zona învecinată extremității concentratorului (prin reglarea intensității activării ultrasonice);
- modificării parametrilor definitorii a interfeței de contact fluid-solid (peretele canalului de curgere) fie pentru evitarea declanșării curgerii turbulente fie pentru majorarea vitezei de curgere a topiturii și creșterea productivității.

Soluția constructivă poate fi dată de duza finală, cu închidere cu ac sau filiera de extrudare a căror element central, figurile 2.2-2.4, 2.6, 2.8, poate fi înlocuit de concentratorul unui ansamblu ultrasonic, figura 3.15, special proiectat pentru integrarea lui în ansamblul dispozitivului de punere în formă (capitolul 4).

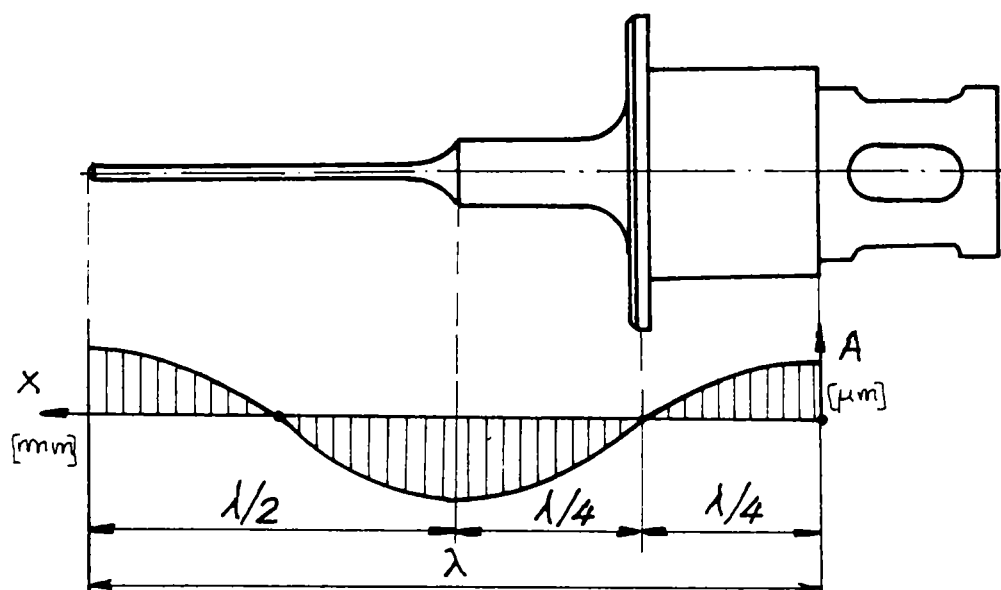


Figura 3.15 Ansamblu ultrasonic

## Aplicații posibile. Obiectivele cercetării

În baza analizei celor prezentate în capitolele 1, 2 și 3, considerăm că activarea ultrasonică poate fi de un real folos în aplicațiile industriale care presupun procesarea sau utilizarea unui fluid vâscos prin îmbunătățirea performanțelor procedurilor de prelucrare în cauza ca urmare a manifestării efectelor specifice (a se vedea capitolul 3) care determină modificări ale parametrilor interfeței de contact fluid-solid și ale comportării reologice a fluidului (a se vedea capitolul 1).

În acest context, în domeniul procesării materialelor polimerice pentru punerea lor în formă (capitolul 2 al acestei teze) propunem spre aplicare următoarele soluții tehnice de activare ultrasonică:

### Matrită de injectare cu canale calde activată ultrasonic

Așa cum s-a arătat în capitolul 2, una din cele mai evoluate variante constructive de matrită de injectare este cea cu canale calde la care, în blocul de distribuție încălzit și termostatat se montează duze cu anticamera care cuprind în construcția lor elemente încălzitoare de tip rezistență cu rolul de a compensa pierderile termice și de a menține la temperaturi optime de procesare materialul plastic aflat în blocul cald și în vecinătatea imediată a cuibului matritei, figurile 2.2 și 2.6. Duzele pot fi prevăzute atât cu elemente de încălzire interioară încorporate cât și cu încălzire exterioară suplimentară (tip Thermoplay sau Incoe) consumul energetic al acestor componente putând atinge 1100 Wh pentru o duză finală.

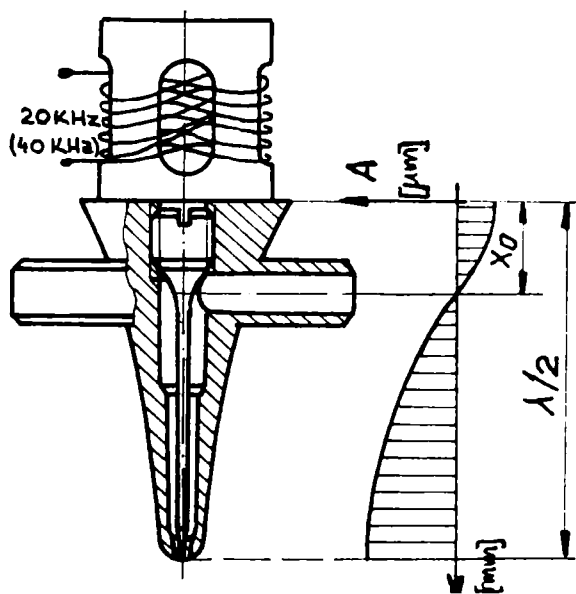


Figura 4.1 Ansamblu ultrasonic și distribuția amplitudinii oscilațiilor ultrasonice

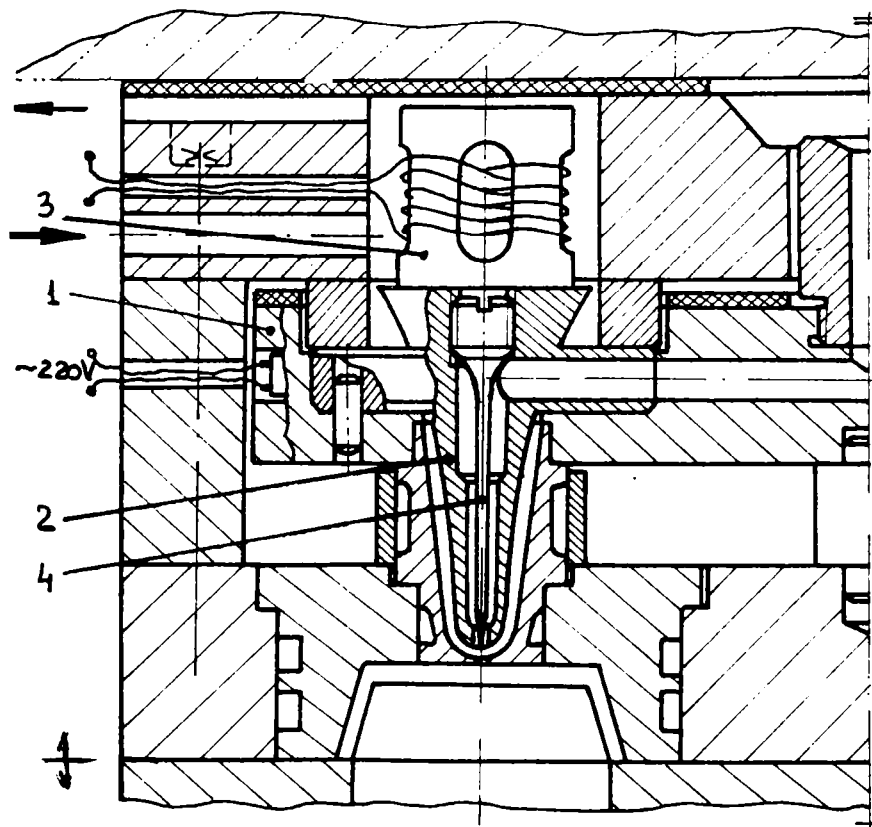


Figura 4.2 Ansamblu ultrasonic încorporat în construcția matritei cu canale calde.

Este de așteptat ca în cazul unei matrițe cu canale calde cu duze finale, a căror element central a fost substituit cu partea terminală corespunzător prelucrată a unui concentrator adaptor de undă, figura 4.1, în timpul activării cu ultrasunete să se producă o intensă concentrare de energie ultrasonica în zona de capăt a concentratorului. Sub forma de energie termică, acest aport energetic se transmite materialului plastifiat ce trece prin duza. Ca urmare, se pot manifesta efectele prezentate în capitolul 3:

- efecte de volum, marcate prin creșterea temperaturii topiturii și fluidizarea ei;
- efecte de suprafață constând în reducerea forțelor de frecare la contactul materialului plastic cu suprafețele concentratorului prin modificarea energiei de suprafață a interfața solid-fluid.

Rezultatul poate fi o netă ameliorare a proprietăților de injectare a materialului procesat prin creșterea temperaturii acestuia și prin modificarea nivelului energiei de suprafață, conform celor prezentate în capitolul 1, în condițiile unor consumuri reduse de energie, maxim 100 +150 W, absorbită de la rețeaua de alimentare.

O astfel de matriță de injectare cu canale calde și activare ultrasonica, figura 4.2, poate fi realizată din adaptarea unui distribuitor central 1 de construcție clasică pentru a încorpora, la nivelul zonei nodale de flansa, un concentrator adaptor de unda 2 a cărui capăt activ are o geometrie armonizată cu cea a duzei de injectare, stabilind interstițiul tehnologic impus de procesul de injectare. În interiorul concentratorului adaptor de undă, în canalul central de alimentare, se găsește montat prin înșurubare acul-concentrator 4 al cărui capăt realizează, cu corpul concentratorului-duza, interstițiul adecvat procesului de injectare. La capatul opus, se atașează concentratorului un transductor 3 magnetostrictiv sau piezoceramic conectat generatorului de ultrasunete și care este răcit în timpul funcționării prin orificii corespunzătoare practicate în corpul matriței. În zona interstițiului format de acul concentrator și concentratorul duza se realizează un puternic efect de volum și unul de suprafață specific emisiei ultrasonice, cu efecte favorabile procesului de injectare.

Avantajele acestei variante constructive de matriță de injectare cu canale calde ar putea fi:

- îmbunătățește bilanțul termic de ansamblu al matriței deoarece, în vecinătatea cuibului rece, asigură funcționarea unui ansamblu duza-anticameră care nu mai necesită încălzire cu elemente rezistive, scăderea temperaturii topiturii în vecinătatea cuibului fiind compensată prin efectul termic al activării ultrasonice;
- asigură, la o construcție simplă și fiabilă, posibilități de reglare fină, în timpul exploatării matriței, a nivelului energiei ultrasonice debitate și deci de control facil a comportamentului reologic al topiturii și, implicit, a derulării procesului de injectare ;
- asigură condiții optime procesului de injectare prin efectul de volum și de suprafață cu consumuri considerabil reduse de energie

**Soluția tehnică prezentată constituie obiectul unei cereri de brevet de invenție, răspunsul din partea Oficiului de Stat pentru Invenții și Mărci fiind favorabil, ANEXA 4 .**

### **Procedeu și cap de extrudare cu activare ultrasonică**

Un interes deosebit în ceea ce privește posibilele aplicații ale activării ultrasonice la extrudare ar putea fi manifestat în cazul capului de extrudare cu element central reglabil utilizat la extrudarea profilată sau în procedeele de extrudare-suflare, figura 2.8. Poziția elementului central al unui astfel de dispozitiv poate fi reglată axial, prin poziționarea acestuia putându-se controla valoarea interstițiului de curgere pentru materialul plastifiat. Acest element central este fix în timpul desfășurării operației de prelucrare și poate fi dotat cu element de încălzire interioară încorporat destinat compensării pierderilor termice și menținerii temperaturii topiturii la un nivel acceptabil de procesare.

Ca procedeu de reducere a frecării la perete a topiturii de polimer prelucrat s-a experimentat utilizarea materialelor fluorurate care pot fi depuse sub forma de film pe suprafețele active ale duzei de extrudare, sau folosirea lor sub forma de aditiv în materialul procesat pentru a facilita alunecarea materialului topit pe pereții canalului tranzitat, pentru a crește debitul maxim admisibil și pentru a îmbunătăți calitatea suprafețelor generate prin extrudare. Dezavantajul utilizării acestor soluții este creșterea importantă a costului operațiunii de prelucrare.

Considerăm că înlocuirea elementului central al unui astfel de dispozitiv de extrudare cu concentratorul unui ansamblu ultrasonic, figura 4.3, special proiectat pentru integrarea sa în ansamblul capului de extrudare, permite exploatarea efectului de suprafață al activării ultrasonice, capitol 3 al tezei, constând în reducerea forțelor de frecare la contactul materialului plastifiat cu capătul concentratorului, și a efectului termic specific, ce se manifestă prin creșterea temperaturii materialului plastic și, în consecință, fluidizarea lui în vecinătatea acestei zone, în scopul ameliorării performanțelor capetelor de extrudare prin îmbunătățirea proprietăților reologice ale topiturii.

Soluția constructivă pentru un astfel de cap de extrudare cu activare ultrasonică poate fi dată de adaptarea corpului unui dispozitiv de extrudare 1, de construcție clasică, pentru a încorpora, la nivelul zonei nodale de flanșă, un concentrator adaptor de undă 2 adecvat constructiv, la capătul activ, cu duza (placa) de extrudare 3, figura 4.4. La capătul concentratorului adaptor de undă, se găsește montat prin înșurubare vârf interschimbabil 4 al cărui capăt realizează, cu duza calibrată de extrudare, 3, interstițiul adecvat procesului de extrudare. La capătul opus al concentratorului 2, se atașează un transductor 5 magnetostrictiv sau piezoceramic conectat la generatorul de ultrasunete și care este răcit în timpul funcționării cu apă.

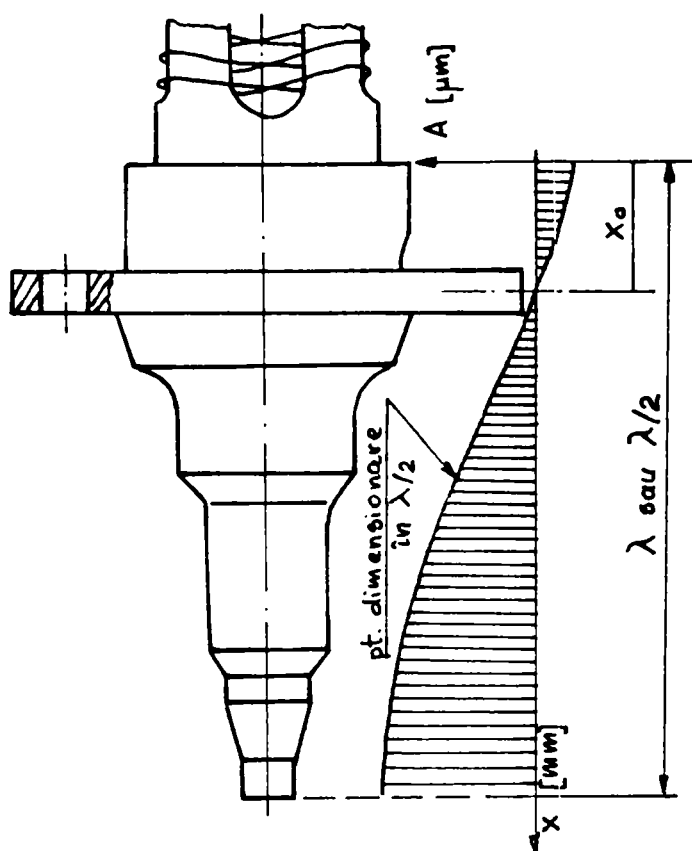


Figura 4.3 Ansamblul ultrasonic și distribuția amplitudinii oscilațiilor.

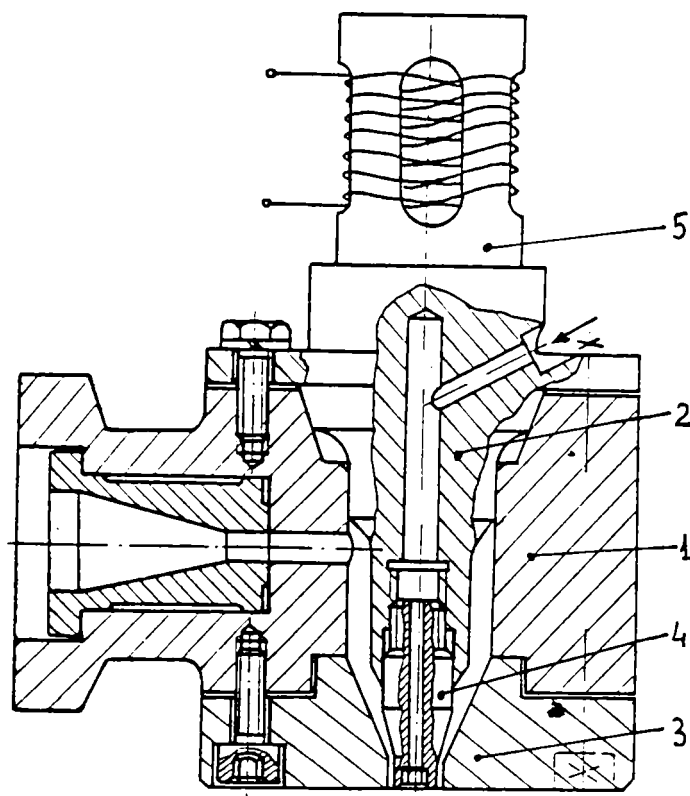


Figura 4.4 Secțiune prin capul de extrudare cu activare ultrasonică.

Avantajele acestui dispozitiv de extrudare cu activare ultrasonică ar putea fi multiple:

- în timpul activării cu ultrasunete, la capatul concentratorului se produce o intensă concentrare de energie ultrasonică care se manifestă prin efectul termic (expresie a conversiei energiei ultrasonice în energie termică) și deci creșterea temperaturii și fluidizarea topiturii;
- la nivelul suprafeței de contact cu materialul plastifiat se manifestă efectul de suprafață al unde ultrasonice constând în reducerea forțelor de frecare și ameliorarea proprietăților de curgere (alunecare) a materialului procesat;
- poate fi înlăturat dezavantajul distribuției neuniforme a câmpului termic în secțiunea de ieșire a materialului procesat prin posibilitatea de reglaj continuu, precis a nivelului activării ultrasonice deci a efectului termo-acustic;
- ar putea asigura o majorare semnificativă de debit maxim admisibil la extrudare prin întârzierea apariției defectelor specifice extrudării;
- asigură, la o construcție simplă și fiabilă, posibilități de reglaj fin, continuu, a nivelului energiei ultrasonice și deci de control adecvat a activării procesului de extrudare.

Soluția tehnică prezentată constituie obiectul unei cereri de brevet de invenție, răspunsul din partea Oficiului de Stat pentru Invenții și Mărci fiind, de asemenea, favorabil, ANEXA 4.

Pentru verificarea aplicabilității acestor soluții tehnice s-au formulat următoarele obiective ale tezei de doctorat:

- stabilirea factorilor de influență în cazul activării ultrasonice a extrudării polietilenei;
- extinderea cercetărilor asupra mai multor materiale termoplaste utilizate în mod curent în industrie: polipropilena, ABS, policarbonați, polisulfone;
- ordonarea factorilor de influență după efectul lor asupra variabilei de răspuns (cantitate de material extrudat) și stabilirea eventualei influențe a interstiului de curgere, presiunii și temperaturii topiturii asupra intensității efectului activării ultrasonice;
- studii privind geometria optimă a vârfului concentratorului ca element central al duzei de injectare sau a capului de extrudare;
- identificarea condițiilor și limitelor de aplicabilitate ale activării ultrasonice în procese ce implica curgerea materialelor viscoase ;
- punerea în evidență și înregistrarea rezultatelor efectului termic și de suprafață ale activării ultrasonice;
- punerea în evidență a eventualelor efecte ale activării ultrasonice asupra structurii supramoleculare a extrudatului.

Aplicarea activării ultrasonice în domeniul procesării prin injectare și extrudare a materialelor polimerice fiind inedită, programul de experimentare abordat pentru evidențierea eventualelor efecte pozitive va avea un rol prospectiv cu scopul de a defini direcțiile de aprofundare, în continuare, a cercetării.

Tinând seama de modalitățile de investigare accesibile și posibilitățile de procurare a mijloacelor necesare cercetării se propune studierea problematicii definite în titlul tezei în mod indirect (conform strategiei adoptate și de alți autori citați în capitolul 1) prin urmărirea, în principal, a debitului volumetric extrudat.

Se poate utiliza în acest scop un reometru adaptat configurației soluțiilor tehnice propuse, figurile 2.2 și 2.4. Acesta, prin construcția sa, va trebui să permită studiul comparativ al curgerii topiturii printr-un spațiu tehnologic (creat între duza și un element central constituit din concentratorul unui ansamblu ultrasonic).

În condițiile menținerii invariabile a valorilor de prereglaj pentru interstiul de curgere, temperatura topiturii și presiune, tinând seama de efectele posibile ale activării ultrasonice, pentru

atingerea obiectivelor fixate, standul de experimentare va trebui sa permită și determinarea temperaturii materialului la ieșirea din duza de extrudare.

Valorile acesteia și cele ale debitului volumetric extrudat vor fi folosite la interpretarea rezultatelor experimentale și formularea concluziilor.

În cazul unor concluzii finale favorabile, rezultatele experimentale pot fi extrapolate și utilizate pentru formularea unor soluții tehnice de activare ultrasonica în alte domenii fundamentate pe reologia și dinamica fluidelor: acționari hidraulice (sisteme de poziționare de precizie), aeronautica.



**Proiectarea și realizarea standului experimental  
pentru activarea ultrasonică a proceselor de curgere  
a materialelor vâscoelastice**

**5.1. Cerințe privind parametrii de exploatare**

Fenomenologic, curgerea de tip Poisseuille este caracterizată de flux laminar a topiturii într-un tub capilar (raport  $L/D$  de valoare ridicată) și presupune acceptarea următoarelor ipoteze simplificatoare:

- curgerea este permanentă, laminară și izotermă;
- viteza de curgere nu are decât o componentă, axială;
- nu se produce "alunecarea la perete" a masei topite tranzitate prin tub;
- topitura este incompresibilă și nu suferă modificări de structură astfel încât solicitarea de forfecare indusă în volumul topiturii este unicul parametru ce influențează gradientul de viteză de forfecare aparentă (sau "debit redus").

După cum s-a arătat în primul capitol valabilitatea acestor considerente este restrânsă la zona I de curgere, figurile 1.19, 1.21, 1.22, deoarece încă din zona de tranziție spre zona II, în mod intermitent și incontrollabil, se declanșează alunecarea la perete.

De aceea, soluția constructivă și dimensionarea standului experimental trebuie să satisfacă următoarele cerințe:

- să permită studiul proprietăților reologice în zona I de curgere (unde fluidul are o comportare reologică newtoniană și, în vecinătatea peretelui, viteza de deplasare a topiturii este neglijabilă) în condițiile asigurării curgerii laminare și de stabilitate valorică a parametrilor curgerii;
- să permită modificarea condițiilor limită la interfața de curgere fluid-peretele canalului de curgere astfel încât să se declanșeze alunecarea la perete în zona I de curgere;
- să permită modificarea condițiilor de procesare ale topiturii:
  - temperatură, presiune, secțiune de curgere, interstițiu de curgere;
  - reglajul puterii și frecvenței de rezonanță a sistemului de activare ultrasonică;
  - timp de curgere.

în condiții de precizie satisfăcătoare, într-o gamă largă de valori care să permită studiul variației indicelui topiturii, capitolul 1.6, ca mărime de răspuns;

- să asigure stabilitatea funcționării și a parametrilor de reglaj în timpul experimentului astfel încât erorile aleatoare induse să fie minime;
- să permită înregistrarea valorilor instantanee de temperatura în zona de lucru.

## 5.2. Soluția tehnică de realizare a standului experimental

Studiul realizat în cadrul acestei lucrări este orientat spre definirea comportamentului reologic al materialelor polimerice în stare topită, vâscoelastice, la parcurgerea unui traseu de curgere de secțiune finită în cazul activării ultrasonice a zonei centrale a secțiunii de curgere.

Pentru punerea în evidență a proprietăților reologice ale topiturii, principiul de bază utilizat a fost asigurarea curgerii în flux laminar printr-un tub capilar, urmărindu-se evoluția variabilelor debit volumic și temperatura materialului în secțiunea de ieșire ca funcții de temperatura topiturii, presiune, geometria duzei de extrudare, starea de activare ultrasonică.

Deoarece domeniile tehnologice vizate de aplicare a rezultatelor studiului sunt injecția și extrudarea, pentru o abordare cât mai realistă a proiectării studiului experimental, soluția constructivă pentru clasicul reometru capilar, de extrudare - figura 1.31, utilizat pentru studiul curgerii laminare - Poiseuille - a fost adaptată particularităților constructive, geometrice, ale dispozitivelor utilizate de aceste procedee de punere în formă, figurile 2.2, 2.4, 2.8, prin introducerea unui element central concentric cu duza de extrudare.

Din punct de vedere funcțional, acest dispozitiv reologic, figura 5.1, răspunde cerințelor studiului pe care dorim să-l realizăm și permite cercetarea fenomenelor de activare volumică și de suprafață pe un material experimental în condiții de similaritate în raport cu soluțiile constructive ale duzelor finale sau a capetelor de extrudare modificate în sensul adaptării la activarea ultrasonice. Elementul central al acestora va putea fi constituit din concentratorul unui ansamblu ultrasonic, rezultatul fiind de favorizare a alunecării topiturii, de concentrare și conversie a energiei ultrasonice în energie termică într-o zonă restrânsă - punctul de injecție sau ieșirea din filiera de extrudare.

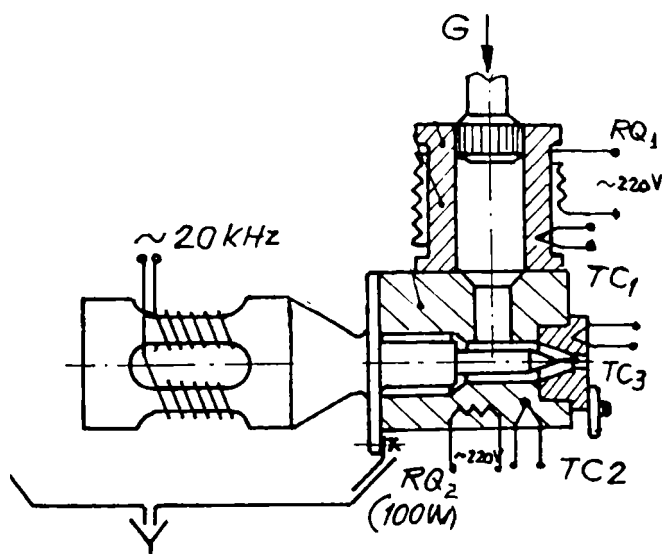


Figura 5.1 Reometru în echer cu activare ultrasonică

### 5.2.1. Stabilirea intervalului de valori pentru temperatura de lucru

Pentru a simula situația reală, din procesele de punere în formă ale materialelor polimerice, standul experimental pentru studiul efectelor activării ultrasonice asupra proprietăților reologice trebuie să asigure termostatarea topiturii de polimer din cilindru de plastifiere până la ieșirea din duza de extrudare.

Este de dorit ca standul să poată fi folosit pentru studiul unei game cât mai largi de materiale polimerice a căror procesare este recomandat a se face în limitele  $T_{\min} \dots T_{\max}$ , de valori particularizate pentru fiecare în parte, ceea ce ar indica necesitatea facilităților de reglaj ale sistemului de termostatare pentru valori de temperatura  $T \in [ \min(T_{\min}), \max(T_{\max}) ]$ .

Dat fiind caracterul experimental prospectiv al determinărilor pe care ne-am propus a le realiza, considerăm că studiul proprietăților reologice ale topiturii trebuie extins, inferior, pentru valori de temperatura până la  $T_v$ , pentru fiecare material în parte, astfel încât reglajul de temperatura să se poată face pentru oricare din valorile  $T \in [ \min(T_v), \max(T_{\max}) ]$ . Ținând seama de valorile prezentate în tabelele din ANEXA 1, sistemul de termostatare va trebui să permită reglarea la valori de temperatura aparținând intervalului  $T \in [ 50, 300 ]$  °C.

### 5.2.2. Stabilirea ordinului de mărime pentru debit și presiune de extrudare

Ca urmare, conform celor prezentate în capitolul 1, figura 1.21, în zona de tranziție a curbilor de curgere ale topiturilor de polimeri extrudate există:

- un interval de debite ( $Q_{C1}, Q_{C2}$ ) în care presiunea nu se stabilizează sau
- un interval de presiuni ( $p_{C2}, p_{C2}$ ) în care fiecărei valori ale presiunii îi pot corespunde două valori de debit stabil, una situată în zona I de curgere și cealaltă în zona II, trecerea de la o valoare la alta fiind bruscă.

Ținând seama de aceste concluzii, programul de experimentare pe care l-am efectuat a fost proiectat a se realiza în zona I de manifestare reologica,  $Q < 10 \text{ mm}^3/\text{s}$ , astfel încât posibila translație a curbilor de curgere, prin creșterea debitului ca urmare a activării ultrasonice, să nu plaseze experimentele în zona de instabilitate a curgerii în care variațiile ciclice de debit și presiune generate determină manifestarea defectelor de extrudare prezentate în capitolul 1.4.1.

În aceste condiții presiunea maximă ar putea fi  $p_{\max} = 10 \dots 15$  bari, similară ca ordin de mărime cu presiunea la care este supusă topitura în cazul extrudării.

Pentru asigurarea unei valori constante în timp și de-a lungul cursei pistonului este dorit ca această presiune să fie generată prin încărcarea pistonului cu mase de valoare cunoscută, corespunzătoare presiunii ce se urmărește a se realiza.

### 5.2.3. Stabilirea volumului cilindrului de plastifiere și a ordinului de mărime pentru timpul de extrudare

Datorita inerției termice a materialelor metalice din care sunt constituite componentele matrițelor de injectare, capetelor de extrudare sau ale unui astfel de stand experimental, în practică se constată variații ciclice, inevitabile, ale temperaturii în jurul valorii medii ale intervalului de temperatura în care se face termostatarea, oricât de restrâns ar fi acest interval.

Aceste variații termice, figura 2.9, se transmit și volumului topiturii supuse studiului și vor determina modificări ciclice ale proprietăților de curgere, ecuația WLF, (1.60), exprimate prin fluctuațiile ale debitului redus sau ale presiunii la ieșirea din filieră constatate experimental de Durand [43], figura 1.19.

Pentru a reduce cât mai mult influența acestui fenomen asupra preciziei rezultatelor experimentale am considerat că timpul de curgere a extrudatului (după care se face tăierea acestuia) trebuie să fie superior ca valoare și, dacă este posibil, multiplu al perioadei ciclului de variație:

$$t > T = 0.2 \dots 1 \text{ minute, } t = k \cdot T, k = 1, 2, 3, \dots$$

astfel încât masa de material polimeric extrudat să fie expresia valorilor medii ale proprietăților reologice ale topiturii.

Având în vedere acest rationament, se impune ca acționarea lamei de tăiere a extrudatului să fie comandată de un circuit de temporizare cu o precizie de lucru satisfăcătoare (eroare <1...2%) și reglaj continuu în intervalul  $t = 1 \div 60$  (120) secunde.

Pentru a asigura continuitatea curgerii pe dublul duratei acestui timp (fără activare și apoi cu activare ultrasonica, pentru orificii de iesire de diametru redus  $d = 3 \div 6$  mm) am considerat că volumul cilindrului de plasifiere trebuie să fie de  $100 \div 120 \text{ cm}^3$  astfel încât diametrul pistonului și cursa acestuia ar putea fi:

$$D = 20 \text{ mm si } L = 350 \text{ mm,}$$

$$D = 30 \text{ mm si } L = 150 \text{ mm,}$$

$$\text{sau } D = 40 \text{ mm si } L = 100 \text{ mm.}$$

Prima varianta ar putea asigura presiuni mai mari de lucru pentru aceeași sarcină amplasată pe piston ( $p = 4F / \pi \cdot D^2$ ) iar ultima ar putea fi soluția optimă pentru realizarea unui stand experimental compact, ușor de realizat, exploatat și întreținut.

#### 5.2.4. Stabilirea gamei de valori pentru interstițiul (întrefer) de curgere

În studiile realizate de Benallal asupra efectului de suprafață în cazul topiturilor de polimeri s-a utilizat un reometru rotativ plan-plan, figura 1.27, cu un platou în mișcare de rotație cu o componentă armonică de pulsație  $\omega$ , parametrul geometric variabil fiind distanța dintre cele două plane, fix și mobil. Momentul de torsiune indus în axa platoului fix este mărimea de răspuns, proporțională cu proprietățile reologice (vâscozitatea) ale topiturii manifestate pentru diferite valori de întrefer, figura 1.32.

Ca metoda de investigare aceste experimente diferă de ceea ce ne-am propus a realiza dar ideile de bază a fost aceleași:

- vâscozitatea aparentă variază funcție de mărimea întreferului în care se găsește topitura;
- unul dintre pereți (platou) este activat mecanic, după o lege de variație sinusoidală, fiind posibil ca aceste condiții să inducă modificări de comportament reologic a topiturii.

De aceea considerăm ca rezultatele pot fi extrapolate și utilizate în proiectarea experimentului nostru ce vizează studiul modificărilor de comportament reologic în condițiile activării prin vibrații de înaltă frecvență (ultrasonice).

Astfel, reprezentarea grafică a componentelor modulului aparent  $G^*(\omega)$  în funcție de întreferul "i", se constată stabilizarea valorilor gradientului de viteze de forfecare  $G^*$  pentru întrefer  $i > 0,5$  mm, figura 1.29.

Ca urmare, la proiectarea standului experimental, s-a avut în vedere necesitatea realizării experimentelor pentru mai multe valori de interstiții de curgere "i" soluția constructivă adoptată asigurând posibilități de reglaj a acestora în limitele  $i = 0,5 \div 3,5$  mm.

#### 5.2.5. Stabilirea geometriei duzei de extrudare

După cum s-a arătat în capitolul 3.4, printre efectele previzibile în cazul activării ultrasonice a unor medii vâscoase se numără efectul de suprafață și efectul termic (de conversie a energiei ultrasonice în energie termică în zonele de discontinuitate ale mediului parcurs de unda). În toate aplicațiile industriale cunoscute efectul termic este exploatat la nivelul suprafeței frontale a concentratorului, presupune exercitarea unei presiuni asupra acestei suprafețe și poate fi evidențiat prin măsurarea temperaturii în vecinătatea acestei zone.

Dat fiind faptul că mediul supus studiului, topitura de polimer, este sub presiune și ca tronsonul terminal al concentratorului este "imersat" în acest mediu, este de presupus manifestarea, în mod excepțional, a efectului termic și la nivelul suprafeței laterale a concentratorului.

Având în vedere necesitatea asigurării posibilităților de reglaj pentru mai multe valori ale interstițiului de curgere precum și faptul că un studiu comparativ al efectelor activării ultrasonice pentru situațiile:

- frontal concentrator retras în duza de extrudare și
- frontal concentrator plasat în vecinătatea secțiunii de ieșire din duza

poate pune în evidență, în mod diferențiat, efectul termic produs la nivelul celor două suprafețe ale concentratorului în contact cu topitura (frontală și laterală) considerăm utilă abordarea programului de experimentare procedând la modificarea valorii interstițiului de curgere în două variante:

- A. extrudare activată/neactivată ultrasonic prin interstițiu de curgere variabil  $i = 0,5...2,5$  mm (valori în trepte) obținute prin deplasarea axială a duzei în raport cu vârful concentratorului, figura 5.2.a, cu modificarea poziției secțiunii de ieșire în raport cu frontalul concentratorului. Materialul polimeric topit exercită presiunea la care este supus pe întreaga suprafață a varfului concentratorului fiind de așteptat manifestarea efectului termic atât la nivelul suprafeței laterale a concentratorului cât și, în mod clasic, la nivelul suprafeței frontale a acestuia.
- B. extrudare activată/neactivată ultrasonic prin interstițiu de curgere variabil obținut prin lărgirea progresivă a secțiunii de ieșire a duzei, figura 5.2.b, și păstrarea poziției secțiunii de ieșire în raport cu frontalul concentratorului, situație în care concentratorul este în contact cu fluidul sub presiune doar pe suprafața sa laterală fiind eliminată posibilitatea manifestării efectului termic la nivelul suprafeței frontale.

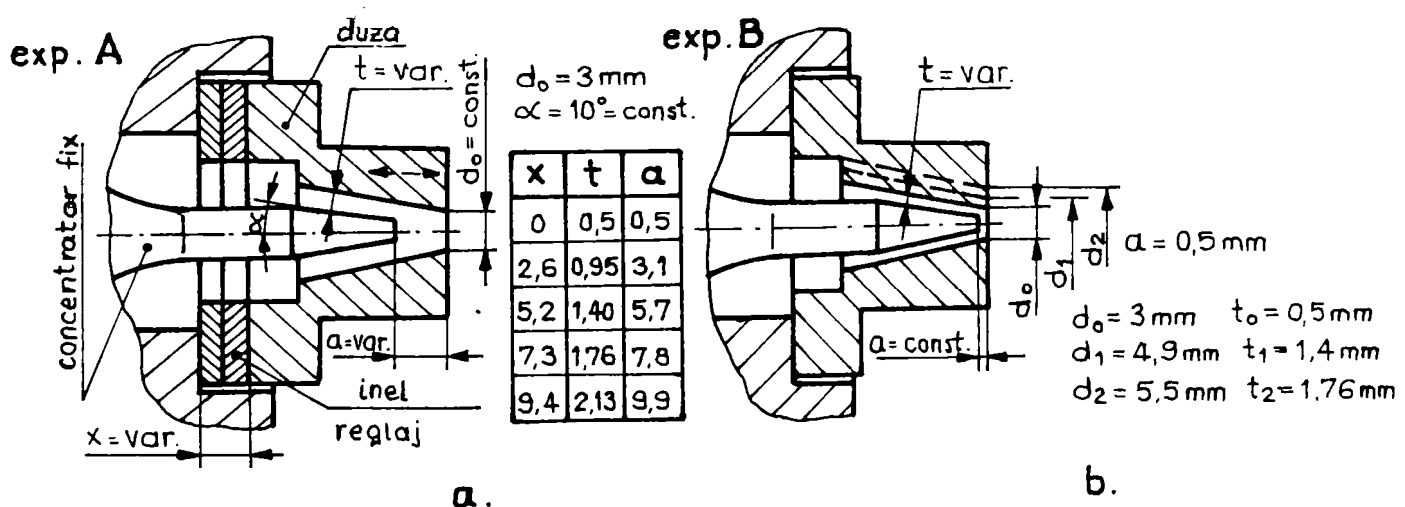


Figura 5.2 Configurația geometrică a duzei de extrudare pentru experimente de tip A și B

În cele ce urmează, din considerente de simplificare a exprimării ideilor, în explicațiile privind derularea experimentelor vom face referire la aceste condiții de lucru ca fiind experimente de tip A și experimente de tip B.

Se poate considera că în aceste condiții particulare ale programului de experimentare, la exploatarea standului experimental, extrudarea se efectuează în zona I de curgere astfel încât, fără activare ultrasonică, fluidul are o comportare reologică newtoniană și, în vecinătatea peretelui, viteza de deplasare a topiturii este neglijabilă (teoretic  $v_a = 0$ ).

Prin aplicarea activării ultrasonice în timpul extrudării este posibilă modificarea condițiilor la limita, de deplasare a topiturii în vecinătatea peretelui, fără a modifica nici un alt parametru de reglaj al procesului (material, temperatura, presiune, interstitiu).

Mărimea de răspuns, care reflectă efectul activării ultrasonice în diferite condiții de lucru, poate fi debitul redus ale cărui valori rezultă prin cântărirea cantității de material extrudat într-un interval prestabilit de timp.

### 5.3. Descrierea standului experimental

Standul experimental prezentat în figura 5.3 are în componența sa șase sisteme principale:

- sistemul pentru activarea cu ultrasunete;
- sistemul de extrudare;
- sistemul pentru plastifierea materialului polimeric și de presare a topiturii;
- sistemul pentru controlul temperaturii și prelevare de date;
- sistemul de separare - marcare;
- sistem de alimentare și schema de comandă, control și protecție.

Elementul de legătură între primele două sisteme este elementul central al duzei de extrudare constituit din vârful concentratorului ansamblului ultrasonic. Acesta transmite și concentrează energia ultrasonică în zona de lucru, a duzei de extrudare.

#### 5.3.1. Sistemul pentru activare cu ultrasunete.

În instalația experimentală, sistemul pentru activarea cu ultrasunete a materialului polimeric plastifiat, figurile 5.3, 5.4, are în componența următoarele:

- A. generatorul electronic de semnal cu posibilitatea de variație a frecvenței și a puterii debitate;

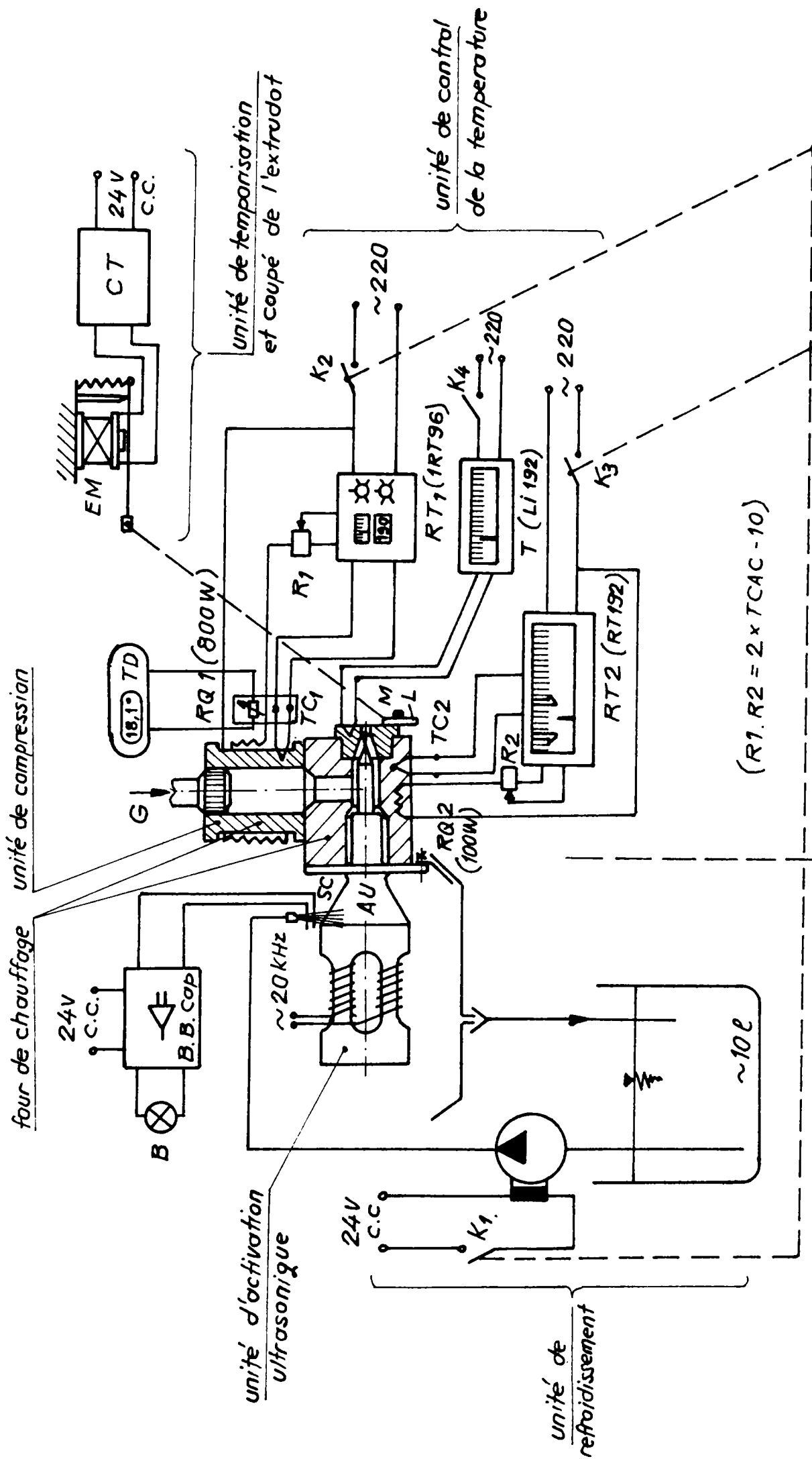


Figura 5.3. Stand experimental pentru studiul activării ultrasonice a extrudării materialelor polimerice



- B. blocul sonic;
- C. sistem de răcire a blocului sonic;
- D. sistemul de alimentare.

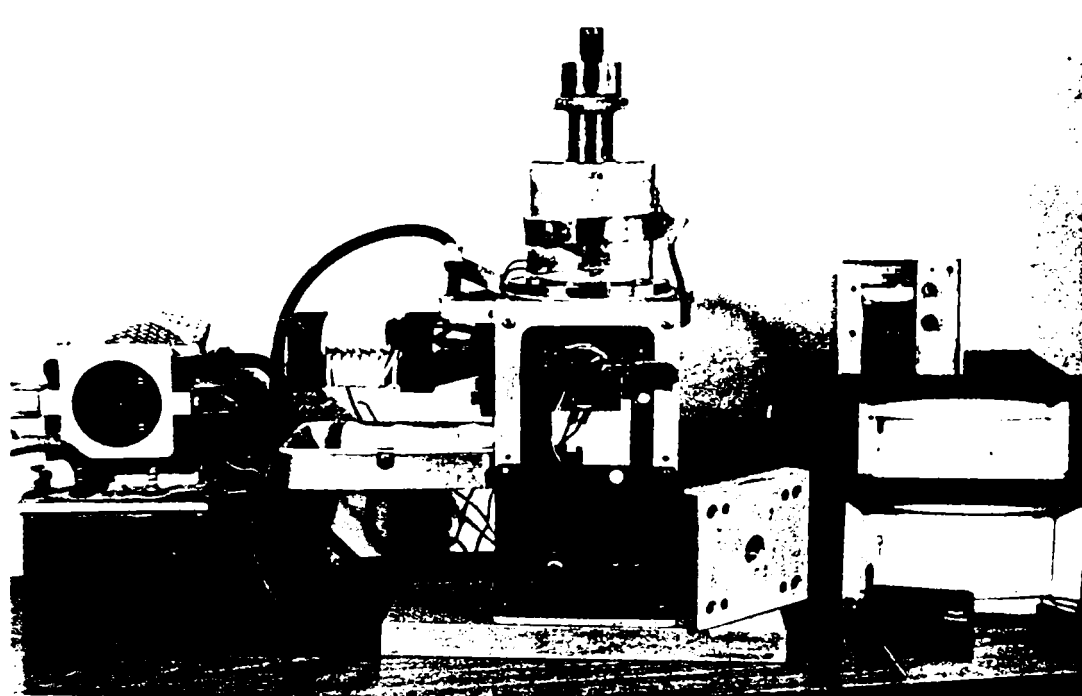
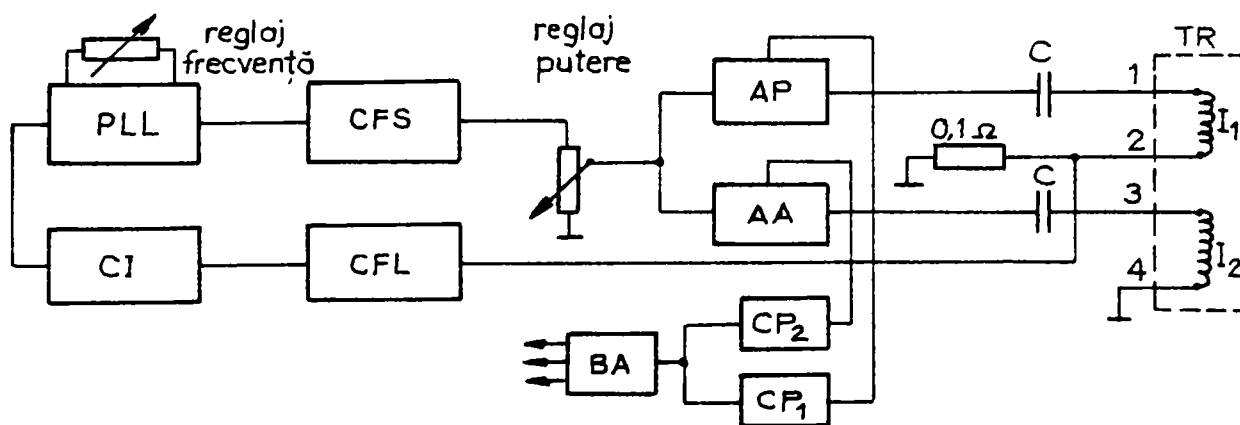


Figura 5.4 Stand experimental. Realizare practică

### 5.3.1.1. Generatorul de ultrasunete

Generatorul de ultrasunete disponibil pentru realizarea standului este de tip GUS - 200, aparat de laborator destinat alimentării transductoarelor de ultrasunete de tip magnetostrictiv cu sau fără prepolarizare magnetică inițială.



- |   |                                  |
|---|----------------------------------|
| CFL-circuit formator și limitator                   | AP-amplificator putere principal |
| CI- circuit de întârziere                           | AA-amplificator putere auxiliar  |
| BA - bloc de alimentare                             | TR-transductor                   |
| $I_1, I_2$ -înfășurări ale transductorului          | PLL-circuit PLL                  |
| $CP_1, CP_2$ - circuite de protecție la supracurent | CFS-circuit formator de sinus    |

Figura 5.5 Generatorul de ultrasunete tip GUS – 200

Partea principală a acestui generator o constituie două module amplificatoare de putere de 100 W (AA și AP), echipate cu tranzistoare finale de tip 2n 3055 funcționând în clasa B, figura 5.5, puterea de ieșire a celor două amplificatoare fiind însumată de către transductor.

Conectarea transductorului la generator se face prin intermediul a două înfășurări ce se leagă prin condensatoare C la ieșirea amplificatoarelor; aceste condensatoare au un rol dublu, pe de o parte realizează îmbunătățirea factorului de putere prin compensarea componentei inductive a transductorului, iar pe de alta parte îmbunătățesc regimul tranzitoriu la conectare, reducând pericolul de străpungeră secundară a tranzistoarelor finale. Una dintre înfășurările transductorului este înseriată spre masa cu o rezistență de valoare mică prin intermediul căreia se prelevează semnal referitor la faza, informație necesară buclei de control a frecvenței.

Bucula de control automat al frecvenței este realizată cu ajutorul unui circuit PLL care este comandat de către un semnal ce conține informații referitoare la faza prin intermediul unui circuit formator-limitator și a unui circuit de întârziere.

Caracteristici tehnice:

- putere maximă de ieșire pe o sarcină de 2x4 ohmi:	200 W reglabil continuu
- valoare maximă efectivă a tensiunii de ieșire:	2 x 23 V
- nivel de distorsiuni la putere maximă:	< 10 %
- valoare maximă efectivă a curentului, în sarcină:	2 x 4,3 A
- valoare maximă a curentului debitat în impuls:	10 A
- gama de frecvență:	18 - 25 kHz
- banda de control automat a frecvenței:	+/- 500 Hz
- tensiunea de alimentare:	220 V
- frecvența nominală:	50 Hz

### 5.3.1.2. Blocul sonic.

Având în vedere considerentele de proiectare și acordare a frecvenței și dificultățile inerente ce apar în proiectarea elementelor concentratoare de undă (capitolul 3) s-a preferat utilizarea unor concentratoare a căror funcționalitate a fost probată în condiții de laborator. Astfel, concentratorul folosit în standul experimental este de tip hibrid, conic - cilindric în trepte în  $\lambda/2$  (conic până la punctul nodal, calculat pentru concentrator conic, apoi - până la punctul de contact cu vârful concentratorului - este cilindric în trepte). Pentru acest tip de concentrator, asamblat cu una și două ferite, ca și pentru un concentrator cilindric în trepte asamblat cu un transductor piezoelectric cu

frecvența nominală de 20 kHz, figura 5.6, s-a determinat frecvența de rezonanță la lucrul în gol și sub sarcina (activare mediu), generatorul de ultrasunete folosit fiind unul cu posibilitatea de reglaj continuu a frecvenței în gama de frecvență 18 - 25 kHz, putere maximă de 100 W.

Construcția standului permite folosirea și a unui ansamblu ultrasonic piezoceramic și generatorul preluat, cu adaptările de rigoare, de la un pistol de sudare cu ultrasunete PSU 150-40 (fabricație Electrotimis SA) cu frecvența nominală de activare de 40 kHz și putere maximă de 150 W. Acest ansamblu prezintă un randament de conversie superior și o sensibilitate sporită în ceea ce privește stabilitatea frecvenței de rezonanță cu temperatura.

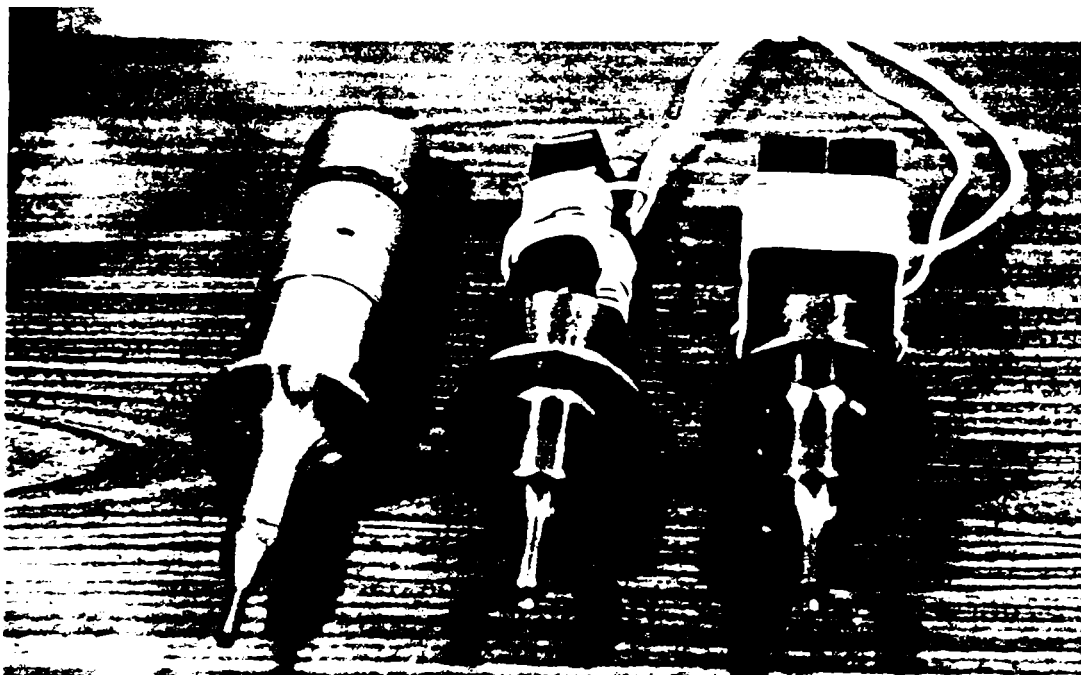


Figura 5.6 Ansamble ultrasonice utilizate

### 5.3.1.3. Sistem de răcire a blocului sonic

Pentru răcirea ansamblului ultrasonic se folosește apa furnizată de o pompă cu membrană capabilă să asigure un debit de 5 - 10 l/min. Aducțiunea și evacuarea apei, după colectarea ei, se asigură prin tuburi flexibile de PVC, figura 5.7.

Atât în cazul transductorului magnetostrictiv cât și în cazul transductorului electrostrictiv, pentru asigurarea integrității ansamblului ultrasonic se impune răcirea continuă a acestuia; o încălzire peste 80...100 °C a rășinii epoxidice cu care s-a realizat lipirea feritei pe concentrator sau a pastilei piezoceramice poate duce la distrugerea ansamblului ultrasonic.

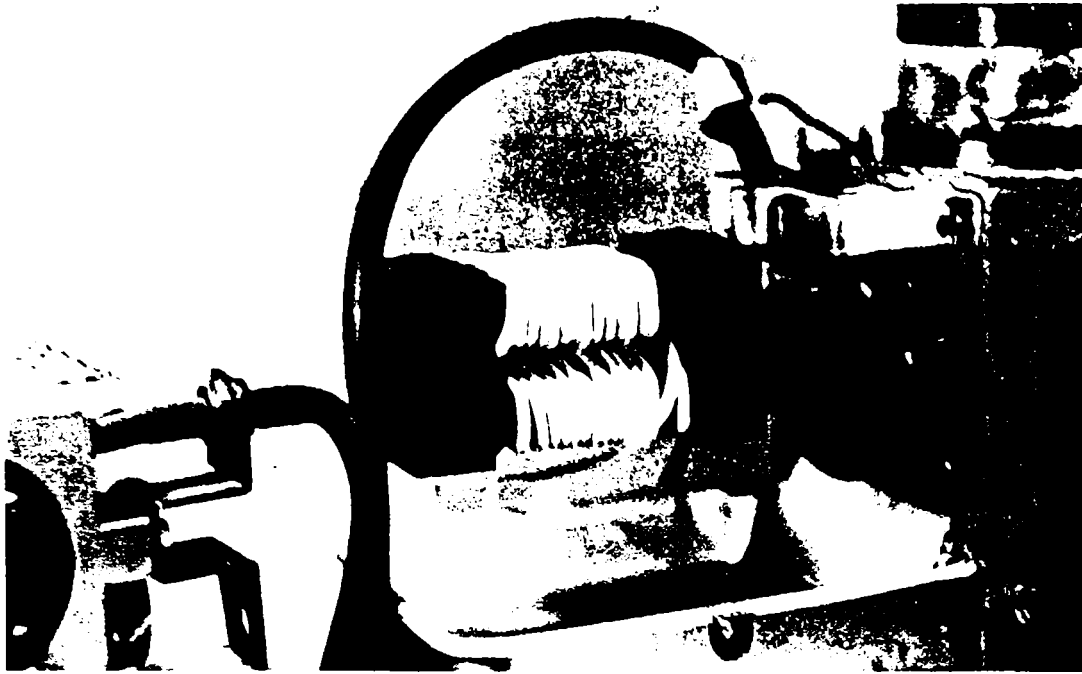


Figura 5.7 Sistemul de răcire a blocului ultrasonic

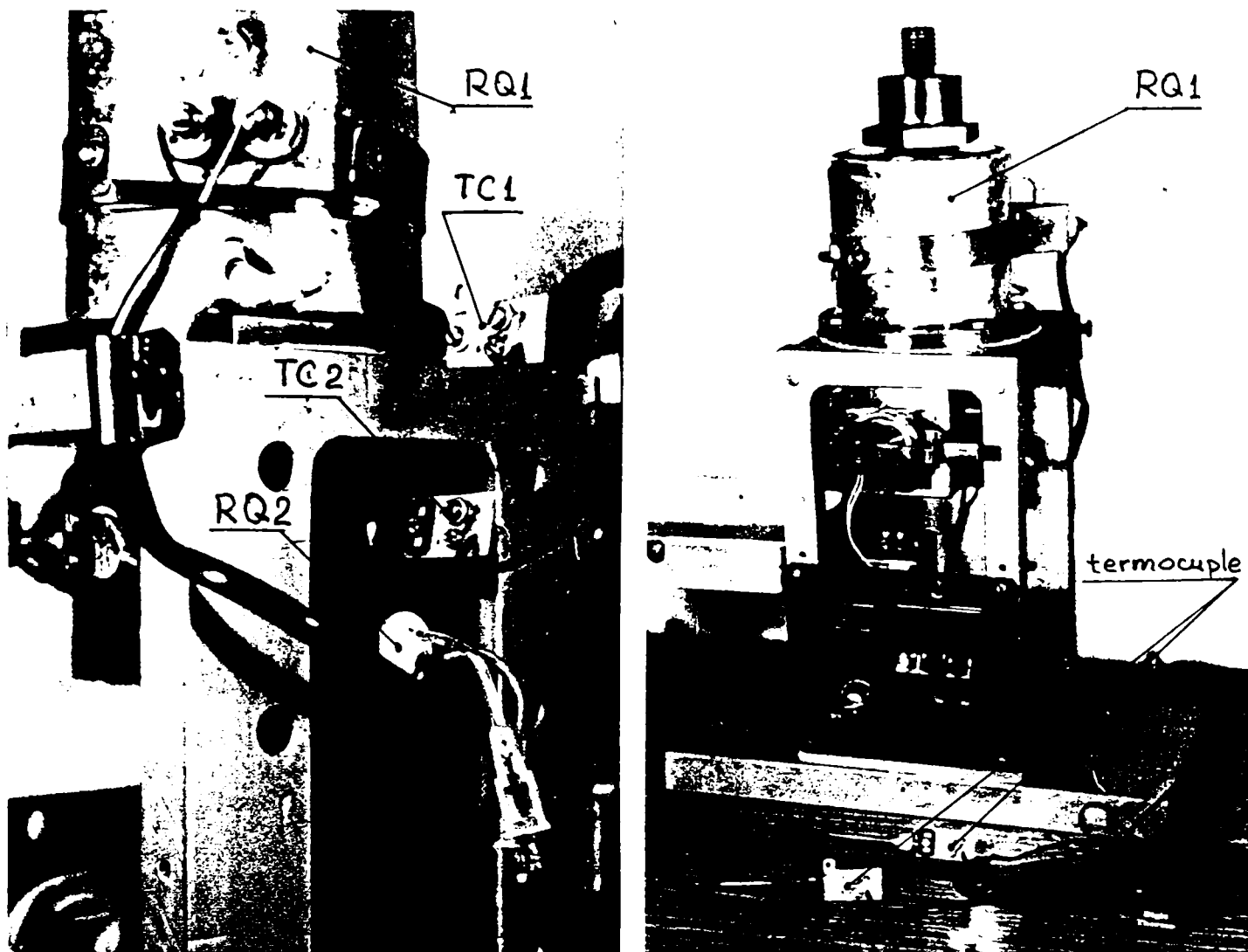
Asigurarea răcirii blocului sonic este o condiție esențială și indispensabilă pentru buna funcționare a standului. De aceea, măsura de prevedere, în construcția standului a fost inclus un circuit electronic basculant bistabil (BBCap), figura 5.3, cu senzor capacitiv (SC) comanda aprinderea intermitentă a becului de semnalizare B (montat pe panoul de comanda), ANEXA 5, în cazul în care lipsește lichidul de răcire.

*Important: Nu se va lasa standul in stare de funcționare, fără supraveghere.*

### 5.3.2. Sistemul pentru plastifierea materialului polimeric, controlul temperaturii și prelevare de date

Pentru aducerea materialului polimeric în stare plastifiată se încălzesc Corp I și Corp II, figurile 5.3 și 5.8a, cu ajutorul a două rezistențe electrice  $RQ_1$  și  $RQ_2$ , de 800 respectiv 150 W, alimentate prin releele R1 și R2.

Termostatarea se realizează cu două aparate reglatoare de temperatura ce comandă releele R1 și R2 și folosesc drept semnal de intrare t.e.m. generată de două termocuple TC1 și TC2, figurile 5.3 și 5.8b. Tot o termocupla, TC3, se folosește pentru punerea în evidență a modificării temperaturii materialului plastifiat supus activării ultrasonice (în vecinătatea vârfului concentratorului).



a.

b.

Figura 5.8 Sistemul pentru plastifierea materialului polimeric și controlul temperaturii

#### Sensibilitate, precizie, domeniu de utilizare.

Tinând seama de necesitatea asigurării controlului temperaturii între 0 și 300 (600)°C, termocuplele TC1, TC2, TC3 folosite pentru prelevare de informații privind temperatura în diferite puncte ale traseului de curgere, figurile 5.3 și 5.8, sunt de tip K = Ni - Cr / Ni - Al (cromel-alumel), clasa a doua de precizie, jonctiune ce asigură precizie și stabilitate în utilizare pentru intervalul de temperaturi de lucru (a se vedea capitolul 2 și ANEXA 4).

Pentru etalonare, s-a folosit relația (2.2) în care t.e.m. generată de sudura rece -  $E_{T_1}$  - se determină din nomograme sau tabele funcție de tipul termocuplei și temperatura sudurii reci (determinată cu termometrul digital TD) iar pentru determinarea temperaturii sudurii calde, funcție de  $E_{T_1}$ , se folosesc tabele de echivalență  $E_{T_1} [\text{mV}] \leftrightarrow T_1 [^\circ\text{C}]$ , (relațiile (2.2), (2.3) și tabelul 2, din ANEXA 2.

### 5.3.3. Sistemul de separare - marcare.

Deoarece scopul cercetărilor este determinarea influenței activării US asupra debitului volumic, ca expresie a indicelui de vâscozitate a materialului plastifiat, a fost necesară realizarea unui sistem de separare - marcare a materialului ce iese prin orificiul calibrat al duzei. Elementul activ al acestui sistem este lama de tăiere M, figurile 5.3 și 5.9, acționată de electromagnetul EM comandat de circuitul (electronic) de temporizare CT a cărui schema este prezentată în ANEXA 5.

Durata temporizării poate fi reglată în intervalul 2 - 120 secunde. Un impuls (comandă) a CT asupra EM, după timpul prestabilit, de temporizare, duce la întreruperea alimentării circuitului de temporizare și la resetarea acestuia deci la reluarea ciclului.

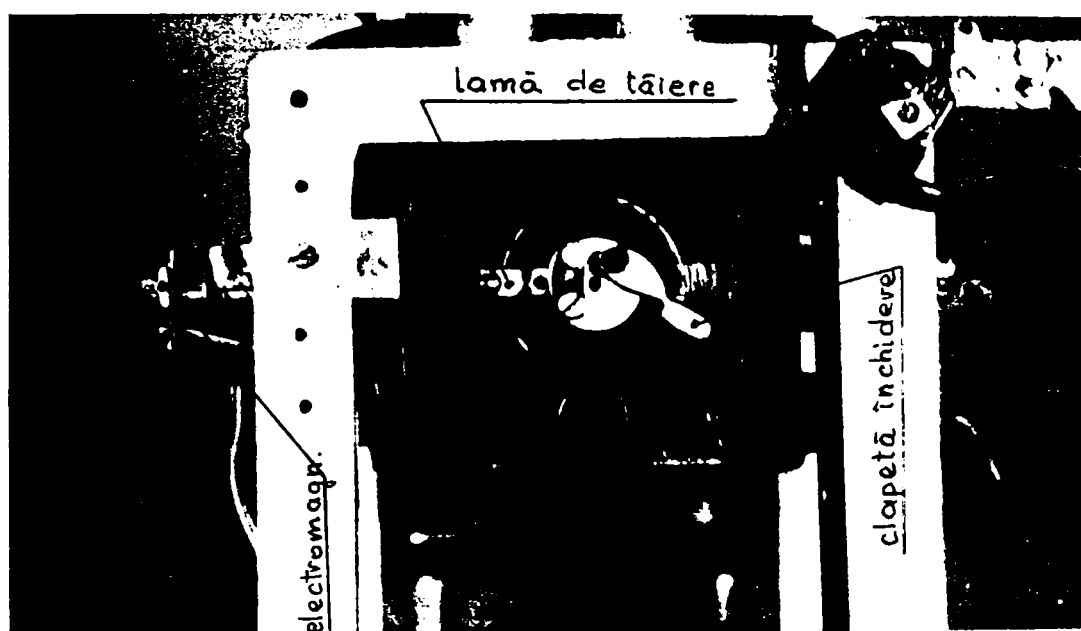


Figura 5.9 Sistemul de separare – marcare

### 5.3.4. Sistem de alimentare și schema de comanda, control și protecție

Schema electrică pentru standul utilizat a fost prezentată în figura 5.3. În măsura posibilităților s-a folosit, pentru alimentarea circuitelor electrice, tensiune de voltaj redus - 24 V - iar circuitele electrice alimentate la 220 V au fost plasate cât mai departe de sistemul de răcire cu apă.

Ca o măsură de prevedere s-a prevăzut legarea la pământ a suportului standului.

Pentru semnalarea eventualelor disfuncționalități s-a prevăzut un sistem de semnalizare a integrității rezistențelor de sarcină (pompa de apă,  $RQ_1$ ,  $RQ_2$ ), ANEXA 5, montat în paralel cu fiecare din întrerupătoarele K1, K2, K3 din figura 5.3. Dioda luminiscentă -LED- este aprinsă doar dacă rezistența de sarcină  $R_S$  este în stare de funcționare (continuitate circuit) dar nu este alimentată, și se stinge atunci când aceasta este alimentată prin închiderea întrerupătorului K1, K2 sau K3.

## Experimentul factorial. Proiectarea programului de experimentare

### 6.1. Experimentul factorial ca instrument de cercetare științifică.

În studiul experimental al proceselor tehnologice în vederea optimizării parametrilor acestora, sunt multe cazuri în care sunt implicați doi sau mai mulți factori, având efect direct asupra răspunsului sistemului dar mai ales interacțiunea acestora primând uneori față de cea a factorilor înșiși. În raport cu investigarea prin loturi (batch) și esanțioane (sample) care necesită replici pentru diferite niveluri ale variabilei independente și deci un număr foarte mare de încercări cu costuri neeconomice, experimentul factorial realizează o reducere importantă a numărului de încercări și optimizare programului de experimentare.

Pentru un experiment care dezvoltă acțiunea a doi factori A și B la nivelurile a și b, se iau în considerare toate combinațiile posibile ale factorilor la cele două niveluri posibile *minim, codificat (-1)* și respectiv *maxim, codificat (1)* pentru fiecare dintre ei.

Tabelul 6.1

		Factor B	
		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
Factor A	A <sub>1</sub>	20	30
	A <sub>2</sub>	40	52

Se definește efectul unui factor asupra sistemului schimbarea în răspuns a acestuia produsă de schimbarea sa în nivel (Tabel 6.1). Totodată acesta se mai numește ***efect principal***, deoarece se referă la un

efect primar a factorului de interes din experiment. Cuantificarea efectului principal se face prin diferența mediilor efectelor la nivelul superior și respectiv inferior al factorului:

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21, \quad (6.1)$$

adică creșterea factorului A de la nivelul (-1) la nivelul (1) implică un răspuns mediu de 21 unități.

În mod similar efectul principal al factorului B este:

$$B = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11, \quad (6.2)$$

Se observă că pentru cele două niveluri ale factorului B, la trecere pe cele două niveluri a factorului A se obțin :  $40 - 20 = 20$  și respectiv  $52 - 30 = 22$ .

Tabel 6.2

		Factor B	
		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
Factor A	A <sub>1</sub>	20	40
	A <sub>2</sub>	50	12

Analizând valorile prezentate în Tabelul 6.2 constatăm răspunsuri de sens contrar ale sistemului la evoluția pe cele două nivel ale factorului A, pentru cele două niveluri ale factorului B, adică:

$$50 - 20 = 30 \quad \text{și} \quad 12 - 40 = -28.$$

De asemenea, dacă se estimează efectul principal al factorului A, aplicând relația (6.1) rezultă :

$$A = \frac{50 + 12}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 1$$

care, fiind foarte mic, putem presupune că efectul lui A la diferite niveluri este neglijabil.

Intr-o astfel de situație trebuie luate în considerare interacțiunile de tip AB ale factorilor principali.

Acest lucru este ilustrat în mod concludent de graficele din figura 6.1, pentru valorile din tabelul 6.1 (figura 6.1a) și tabelul 6.2 (figura 6.1b).

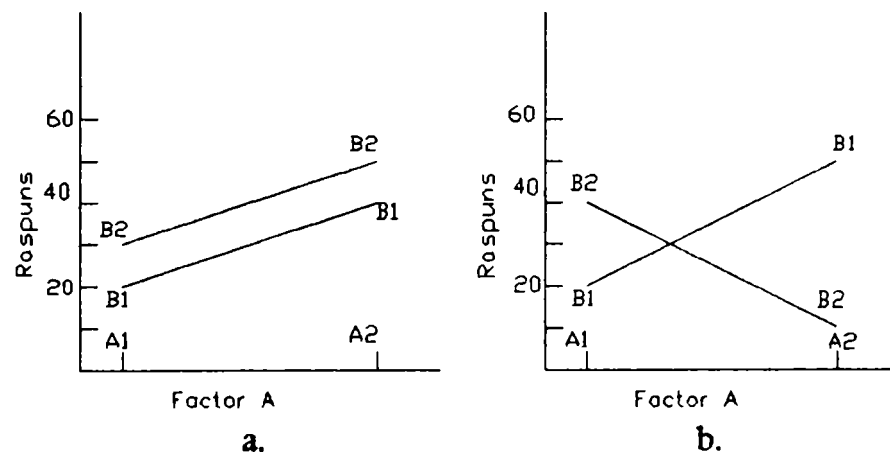


Figura 6.1

Trebuie menționat faptul că prezența unei interacțiuni a doi factori, în unele cazuri, poate masca efectul unui factor principal.

Experimentul factorial prezintă o serie de avantaje în raport cu experimentele care dezvoltă un singur factor la un moment dat. Mai mult, un experiment factorial este recomandat atunci când este suspectă existența interacțiunilor pentru a nu concluziona greșit influența factorilor principali.



## Experimentul factorial $2^k$

Un experiment  $2^2$  dezvoltă efectul a doi factori fiecare la două niveluri numite “inferior” și “superior” spre exemplu influența temperaturii (factorul A) între valorile:  $160^\circ\text{C}$  ( $A_{\min}$ ) și respectiv  $220^\circ\text{C}$  ( $A_{\max}$ ) și a presiunii (factorul B), în intervalul 5 bari ( $B_{\min}$ ) și 50 bari ( $B_{\max}$ ).

Tabel 6.3

Combinatiile experimentului	Replici ale experimentului			
	I	II	III	Total
$A_{\min}, B_{\min}$	28	25	27	80
$A_{\max}, B_{\min}$	36	32	32	100
$A_{\min}, B_{\max}$	18	19	23	60
$A_{\max}, B_{\max}$	31	30	29	90

În mod convențional se notează cu A, B, AB efectele principale și interacțiunea factorilor și cu ‘-’ și ‘+’ nivelurile minim și maxim ale acestora. De

asemenea în mod convențional se notează cu a, b, ab totalurile pentru răspunsul sistemului la valorile maxime ale factorilor principali și respectiv interacțiunea lor, iar cu (1) răspunsurile sistemului la valorile minime ale factorilor principali. Reprezentarea grafică este reprezentată în figura 6.2.

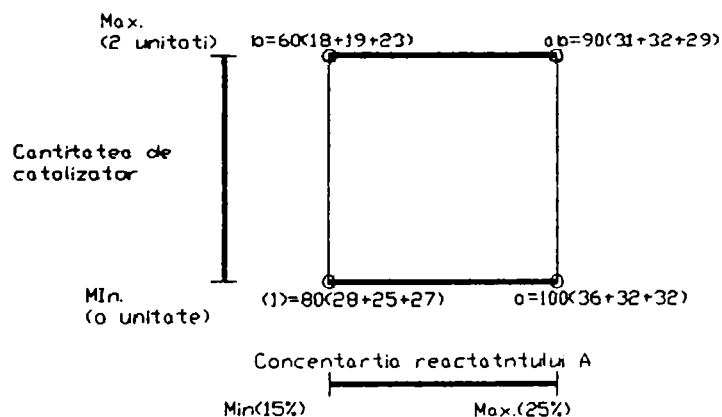


Figura 6.2

Calculul efectelor principale și respectiv a interacțiunii se face prin calculul mediilor la diferențele răspunsurilor pe fiecare nivel după cum urmează:

$$A = \frac{1}{2n} \{ [ab - b] + [a - (1)] \} = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] = 8.33, \quad (6.3)$$

$$B = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] = -5, \quad (6.4)$$

$$AB = \frac{1}{2n} [ab - (1) - a - b] = \frac{1}{2(3)} (90 + 80 - 100 - 60) = 1.67, \quad (6.5)$$

Alte notații convenționale sunt:

$$\text{Contrast}_A = [ab + a - b - (1)]; \text{Contrast}_B = [ab + b - a - (1)]; \text{Contrast}_{AB} = [ab + (1) - a - b], \quad (6.6)$$

Sumele pătratelor efectelor principale :

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{n \cdot 4}; \quad SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{n \cdot 4}; \quad SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{n \cdot 4}, \quad (6.7)$$

Se observă că sumele pătratelor de mai sus s-au calculat pentru  $2-1=1$  grade de libertate corespunzătoare celor două niveluri ale variabilelor independente.

Suma pătratelor totale se calculează pentru  $4 \cdot n - 1$  grade de libertate, iar suma pătratelor erorilor are expresia:

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}, \quad (6.8)$$

Pe baza acestor estimatori se realizează analiza de varianță a efectelor modelului factorial, în tabelul 6.4 fiind redată forma standard pentru exemplul prezentat mai sus:

Tabelul 6.4

Sursa de variație	Suma pătratelor	Gradele de libertate	Media pătratelor	F <sub>0</sub>
A	208.33	1	208.33	53.15 <sup>a</sup>
B	75.00	1	75.00	19.13 <sup>a</sup>
AB	8.33	1	8.33	2.13
Eroarea	31.34	8	3.92	
Total	323.00	11		

Analiza ANOVA permite aprecierea nivelului de semnificație pentru efectele principale și interacțiuni. Pentru cazul de față fiind 1% se confirmă concluziile rezultate pe baza amplitudinii răspunsului sistemului. Analiza rezidualilor pe baza modelului de regresie pentru cele 12 răspunsuri (4 combinații x 3 replici) permit determinarea apariției sau nu a unor tendințe de grupare a valorilor. Modelul de regresie are forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \varepsilon, \quad (6.9)$$

iar coeficienții de regresie:  $e_y = y_y - \hat{y}$

Pe de alta parte, dezvoltarea experimentelor factoriale care implică un număr mare de variabile are neajunsul că mărește foarte mult numărul încercărilor fără a da întodeauna un răspuns cert din punct de vedere fizic. Din acest motiv literatura de specialitate recomandă, pe de

o parte, dezvoltarea treptată a experimentului în funcție de ponderea pe care o au factorii investigați. A doua metodă este cea de dezvoltare a experimentelor fracționare chiar dacă rezoluția acestora scade datorită faptului că la un moment dat avem ca și răspuns o sumă a influenței unui factor principal și a unei fracțiuni a interacțiunilor (secundare) datorate factorilor principali. Pentru a trage o concluzie este necesară dezvoltarea în continuare a experimentului, cu o altă fracțiune opusă primei. Dacă tendința de răspuns se păstrează rezultă ca și concluzie că ponderea o dețin factorii principali. Dacă tendința de evoluție este opusă, este probabil că interacțiunile predomină. Pentru a lămurii acest aspect să considerăm un experiment care dezvoltă 7 factori principali. Un astfel de experiment este destul de mare și ar comporta  $2^7 = 128$  de încercări pentru rulare completă și deci pentru o rezoluție maximă.

Fiind de așteptat ca să apară interacțiuni și deci combinații de factori să dea interacțiuni mai importante se poate reduce sau *optimiza*, reduce la jumătate ( $2^{7-1}$ ), numărul de încercări sau în cazul *Saturated sixteenth fraction* ( $2^{7-4}$ ) la numai 8 încercări. Acest lucru este posibil deoarece o serie de interacțiuni de ordin superior se confundă, spre exemplu:  $ab^2a^2b=b$ .

Este evident că rezoluția unui astfel de experiment scade, dar atâta timp cât putem elimina influența unor factori nesemnificativi experimentul devine totuși foarte avantajos.

## 6.2. Proiectarea programului de experimentare

Programul de cercetare abordat în cadrul tezei de doctorat urmărește definirea exactă a avantajelor tehnice ale activării cu ultrasunete a materialelor polimerice în faze de procesare în raport cu avantajele economice, care ar putea determina ameliorări semnificative ale performanțelor matritelor de injectat cu canale calde și ale filierele mașinilor de extrudare.

În primul caz sunt vizate aspecte de ordin economic (energetic) și al fiabilității pe care le ridică sistemele pe bază de rezistențe electrice, iar în al doilea caz sunt vizate cu precădere aspecte de ordin calitativ specifice proceselor și produselor extrudării. Sunt de așteptat și o serie de efecte conexe cum sunt cele legate de problema stabilității termice a materialelor polimerice și de aditivare a lor.

În cadrul cercetărilor derulate în baza contractelor *CNCSU nr. 4004/1995 - tema 26B, nr. 5004/1996 - tema 374: Studiul activării cu ultrasunete a materialelor polimerice în procesele de transformare și nr. 317/1998 - tema 26: Influența activării ultrasonice asupra unor proprietăți reologice în procesele de curgere a materialelor vâsco-elastice*, după un program de experimentare axat predominant pe cercetarea fenomenelor de activare volumică și de suprafață pe un model experimental apropiat matritelor cu canale calde s-au realizat o serie de încercări preliminare cum ar fi:

- stabilirea frecvenței de rezonanță pentru ansamblele ultrasonice folosite;
- stabilirea preciziei temporizării pentru mecanismul de separare;
- stabilirea factorilor de influență în cazul activării ultrasonice a curgerii topiturilor de polimeri
- stabilirea geometriei optime a duzei de extrudare (cu vârful concentratorului ca element central);
- ordonarea factorilor de influență după efectul lor asupra variabilei de răspuns (cantitate de material extrudat).

care au constituit o etapă preliminară în studiul activării ultrasonice ca soluție pentru îmbunătățirea proprietăților reologice ale materialului vâscoelastic procesat, creșterile de debit relativ fiind semnificative.

O gamă largă de materiale a constituit obiectul acestui studiu preliminar: polietilena de joasă și de înaltă densitate (PEJD, PEID), polipropilena (PP), ABS, policarbonat (PC), polisulfone (PSU) însă comportarea lor în timpul încercărilor a fost diferită după cum urmează :

- PEJD, PEID și PP au fost extrudate, cu sau fără activare ultrasonică, în condițiile de variație a parametrilor de reglaj într-o gama largă de valori. În ceea ce privește calitatea produsul extrudării s-a putut constata apariția defectelor de extrudare în condiții normale de manifestare a acestora : valori mari impuse pentru debitul de extrudare sau presiunea topiturii. A fost posibilă realizarea în bune condiții a unui studiu comparativ, între extrudarea cu și fără activare ultrasonică.
- în cazul PC nu s-a putut realiza extrudarea în limitele de variație a parametrilor de reglaj ai standului decât în prezenta activării ultrasonice iar produsul extrudării prezintă defecte de suprafață accentuate specifice extrudării topiturii la temperatura prea scăzută ;
- nu s-a putut realiza extrudarea, în limitele de variație a parametrilor de reglaj ai standului, în cazul încercărilor realizate cu ABS și PSU.

Aceste insuccese care se datorează în principal :

- scăderii inevitabile de temperatura în zona secțiunii de ieșire din duza de extrudare și
- reacției pe care materialele cu sensibilitate sporită privind temperatura de procesare au manifestat-o în această situație .

au restrâns gama de materiale supuse în continuare studiului, experimentele ce au urmat fiind executate doar asupra PEJD, PEID, PP.

Utilitatea acestor încercări a constat în aceea că au pus în evidență, în cazul extrudării PC cu activare ultrasonică, faptul că o astfel de activare vibratorie de înaltă frecvență în condiții la limita de curgere poate ajuta (determina) depășirea unui anumit prag energetic și declanșarea curgerii.

Din punct de vedere funcțional, acest stand prezentat în capitolul 5, este în concordanță cu soluția constructivă a duzei finale sau capului de extrudare la care, elementul central se constituie în concentratorul unui ansamblu ultrasonic, rezultatul fiind de favorizare a alunecării topiturii, de concentrare și conversie a energiei ultrasonice în energie termică într-o zonă restrânsă - punctul de injectare sau ieșirea din filiera de extrudare, cerere de brevet de invenție, dosar OSIM C/1305/15.10.1997, *Procedeu și cap de extrudare cu activare ultrasonică* și cerere de brevet de invenție, dosar OSIM C/25/09.01.1997 *Matrita de injectie activata cu ultrasunete*).

În continuare, s-a urmărit ierarhizarea factorilor de influență, între care va fi inclusă și activarea ultrasonică, după efectul lor asupra variabilei-răspuns (cantitate de material extrudat/orificiu calibrat) și asupra calității extrudatului (defecte de volum și de suprafață,

modificări ale structurii supramoleculare) fiind realizate mai multe seturi de încercări de extrudare a PEJD, PEID și PP în vederea:

- stabilirii influenței interstițiului de curgere asupra intensității efectului activării ultrasonice
- punerea în evidență și înregistrarea rezultatelor efectului termic al activării ultrasonice;
- stabilirii efectelor activării ultrasonice asupra structurii supramoleculare a extrudatului.

Acest mod de abordare a programului de cercetare poate pune în evidență, în mod comparativ, influența activării ultrasonice în raport cu primii trei factori. Dacă activarea ultrasonică se dovedește a avea același nivel de influență (sau comparabil) ca și temperatura sau presiunea, prin variația cărora se controlează în mod curent comportarea reologica a topiturii (a se vedea capitolul 1), rezultatele acestui studiu ar putea constitui argumente care, coroborate cu cele de la capitolul 3, pot justifica implementarea industrială a soluțiilor tehnice de activare ultrasonică a proceselor de punere în forma a materialelor polimerice propuse în capitolul 4.

Pentru organizarea programului de experimentare în mod experiment factorial și pentru prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale s-a utilizat programul specializat - STATGRAPHICS.

## Rezultate experimentale

## 7.1 Incercări preliminare

## 7.1.a. Stabilirea frecvenței de rezonanță pentru ansamblele ultrasonice folosite

Utilizând schema prezentată în figura 7.1 s-a determinat frecvența de rezonanță la lucrul în gol în acest scop fiind folosit un traductor accelerometric conectat la un osciloscop iar un frecvențmetru digital determina frecvența oscilațiilor generatorului. Frecvența de rezonanță este cea indicată de aparatul de măsură FD pentru un maxim de amplitudine de oscilație a traductorului accelerometric a cărui semnal este prelucrat de osciloscop. De altfel, funcționarea în regim de rezonanță este sesizată și de ampermetrul generatorului de ultrasunete care înregistrează creșterea semnificativă a curentului absorbit.

Rezultatele experimentarilor efectuate pentru stabilirea frecvenței de rezonanță a ansamblului ultrasonic feritic sunt:

$$\gamma_{0\text{FE}} = 19,68 ; 19,74 ; 19,71 ; 19,69 ; 19,70 ; 19,70 ; 19,69 \text{ KHz}$$

iar pentru transductorul piezoelectric

$$\gamma_{0\text{P}} = 20,24 ; 20,32 ; 20,26 ; 20,22 ; 20,28 ; 20,27 ; 20,33 \text{ KHz}$$

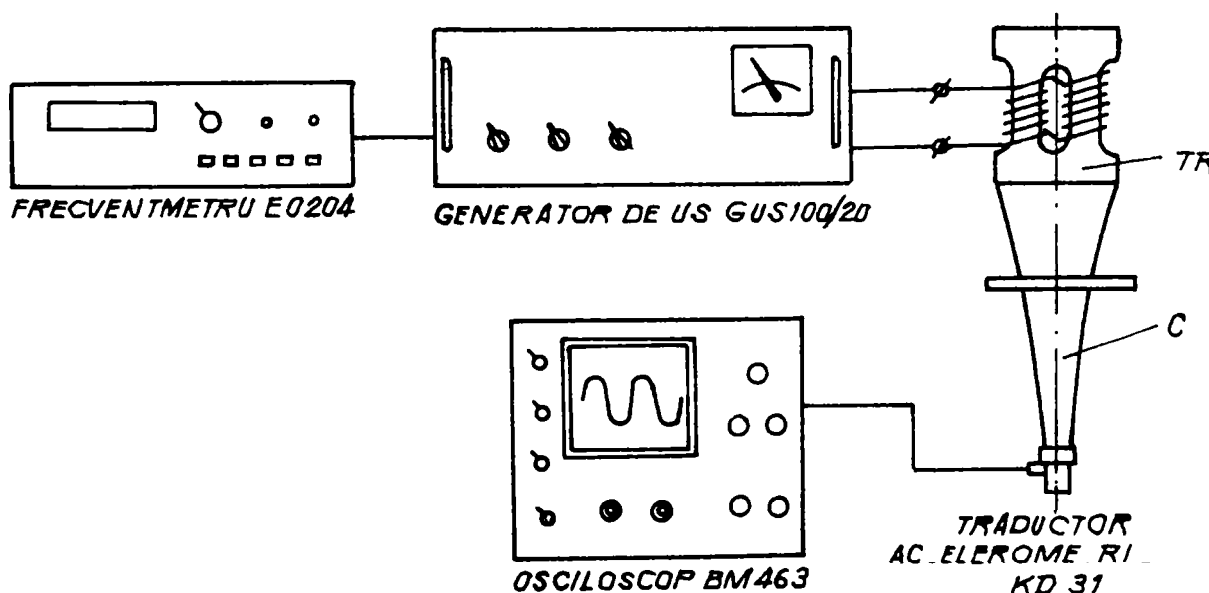


Figura 7.1. Montaj pentru determinarea frecvenței de rezonanță

Se remarcă stabilizarea valorilor măsurate  $\gamma_{0\text{FE}} = 19,70 \text{ KHz}$  și  $\gamma_{0\text{P}} = 20,27 \text{ KHz}$  după aproximativ 30 de minute de funcționare a generatoarelor de ultrasunete.

Pentru lucrul în sarcina (activare mediu plastifiat) generatorul de ultrasunete, cu posibilitatea de reglare fină a frecvenței semnalului furnizat, permite acordarea pe frecvența de rezonanță a ansamblului ultrasonic situație în care curentul absorbit de la rețea crește brusc. Valoarea indicată de frecvențmetru pentru determinări repetate ale frecvenței de rezonanță în sarcina este  $\gamma_{rFE} = 18,615$  KHz respectiv  $\gamma_{rP} = 19,51$  KHz

Se constată o alunecare de frecvență de rezonanță ca efect a schimbărilor condițiilor de funcționare (factorului mecanic), a legăturilor (contactului) ansamblului ultrasonic cu mediul.

#### 7.1.b. Stabilirea preciziei temporizării pentru mecanismul de separare

Utilizând un cronometru electronic, cu timpi intermediari, comandat printr-un circuit electronic cu senzor fotoelectric (pentru a nu introduce legături mecanice suplimentare), pentru o valoare de temporizare reglată la 10 secunde s-a constatat o valoare reală  $t = 9,8 \pm 0,05$  secunde, precizie satisfăcătoare pentru derularea programului de experimentare propus.

De aceasta abatere (câmp de toleranță  $\Delta t = 1\%$ ), care are în vedere frecarea și inerția mecanică a tuturor elementelor componente ale sistemului - lama, ghidaj, elemente mobile releu), s-a ținut seama la interpretarea rezultatelor experimentale.

#### 7.1.c. Stabilirea influenței geometriei subansamblului varf concentrator - suprafața interioară duza.

Pentru încercări realizate în aceleași condiții de lucru, T, G,  $d_0$  și geometrie diferită a ansamblului duza - vârf concentrator (figura 7.2,  $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ), studiul comparativ al debitului volumic la ieșirea din duza de orificiu calibrat la extrudare cu și fără activare ultrasonica, nu a pus în evidența modificări semnificative de debitul motiv pentru care, ulterior, s-au folosit seturi de duze având același unghi  $\alpha = 10^\circ$  și diferite valori ale diametrului orificiului în secțiunea de ieșire.

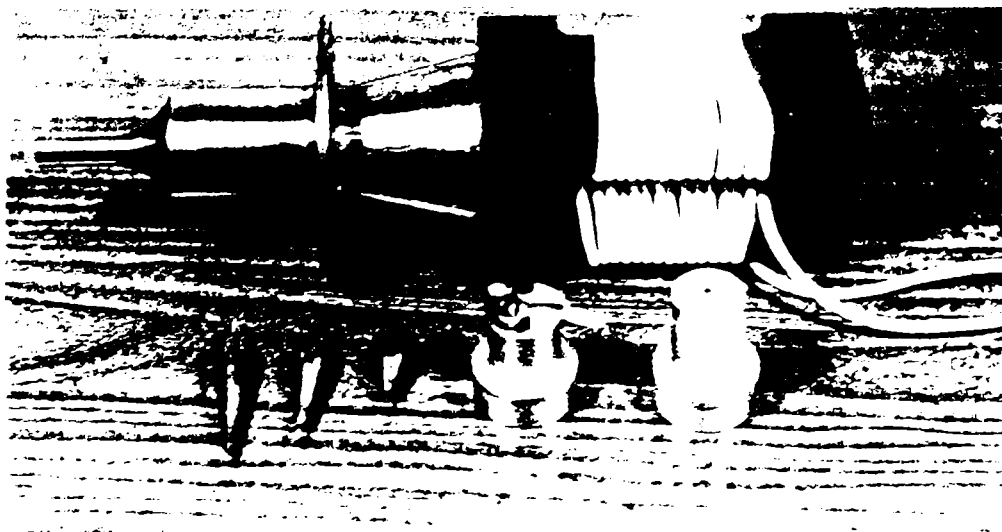


Figura 7.2 Seturi duza extrudare-vârf concentrator



#### 7.1.d. Ordonanțarea factorilor de influență după efectul lor asupra variabilei de răspuns - cantitate de material extrudat

În continuare, prin programul de cercetare abordat s-a urmărit ierarhizarea factorilor de influență după efectul lor asupra variabilei-răspuns (cantitate de material extrudat) și calitatea extrudatului.

În acest scop, pentru definirea programului de experimentare - experiment factorial - și pentru prelucrarea statistică a datelor s-a utilizat programul specializat - StatGrafics, în cazul unui experiment ce ia în considerare trei factori de influență: *temperatură*, *presiune*, *interstițiu de curgere* urmând ca într-o fază ulterioară de experimentare să se analizeze influența a patru factori, adăugând celor menționați și *activarea ultrasonică*.

În cadrul acestui experiment, ca și în cazul celor care au urmat, s-au realizat prin extrudare mai multe eșantioane pentru fiecare set de condiții de lucru, valorile de debit redus,  $q = Q/S$ , ce au fost luate în considerare la interpretarea rezultatelor fiind cele rezultate în urma prelucrării statistice (StatGrafics).

Condițiile de experimentare și rezultatele prelucrării statistice a datelor experimentale pentru experimentul 3 factorial sunt prezentate în tabelul 7.1 iar reprezentarea grafică a estimării efectelor celor trei factori de influență, figura 7.3, pune în evidență importanța temperaturii ca factor de primă importanță privind influența asupra calităților reologice ale topiturii. Nu sunt de neglijat nici efectele presiunii și interstițiului de curgere și ale interacțiunii temperatura-presiune asupra calităților reologice ale topiturii.

Temperatura și presiunea sunt factori asupra cărora se poate interveni prin reglajul mașinii, modificarea acestora fiind posibilă într-o gamă foarte largă de valori. De aceea încercările selective ce au urmat sunt orientate spre studiul unui alt factor de influență, interstițiu de curgere, ca factor de influență, într-un program de experimentare în care s-au luat în considerare 4 factori de influență: temperatură, presiune, interstițiu și activarea ultrasonică.

După cum s-a arătat în capitolul 6, dacă activarea ultrasonică se dovedește a avea același nivel de influență (sau comparabil) ca și temperatura sau presiunea, prin variația cărora se controlează în mod curent comportarea reologică a topiturii, rezultatele acestui studiu aduc justificarea pentru implementarea industrială a activării ultrasonice a proceselor de punere în forma a materialelor polimerice.

**Plastic Experiment    Materiel : P E B D,    Orifice : 3 mm**

**Comment: 3 factor study**

Experimental factors						Response variables		
No.	Name	Low	High	Units	Cont.	No.	Name	Units
A	TEMPERATUR	160	260	°C	Yes	1	QUANTITE	Grams
B	PRESSION	5	20	AtTh	Yes			
C	INTERSTICE	0.5	3	mm	Yes			

**RECOMANDED**

Cursor at Row: 1    Data Editor    Maximum Rows: 9  
 Column: 1    File: STATD10    Number of Cols: 4

Run	TEMPERATUR	PRESSION	INTERSTICE	QUANTITE
1	260.	5.0	0.50	0.260
2	260.	20.0	3.00	0.337
3	260.	5.0	3.00	0.293
4	260.	20.0	0.50	0.318
5	210.	12.5	1.75	0.263
6	160.	5.0	3.00	0.208
7	160.	20.0	3.00	0.230
8	160.	5.0	0.50	0.187
9	160.	20.0	0.50	0.218

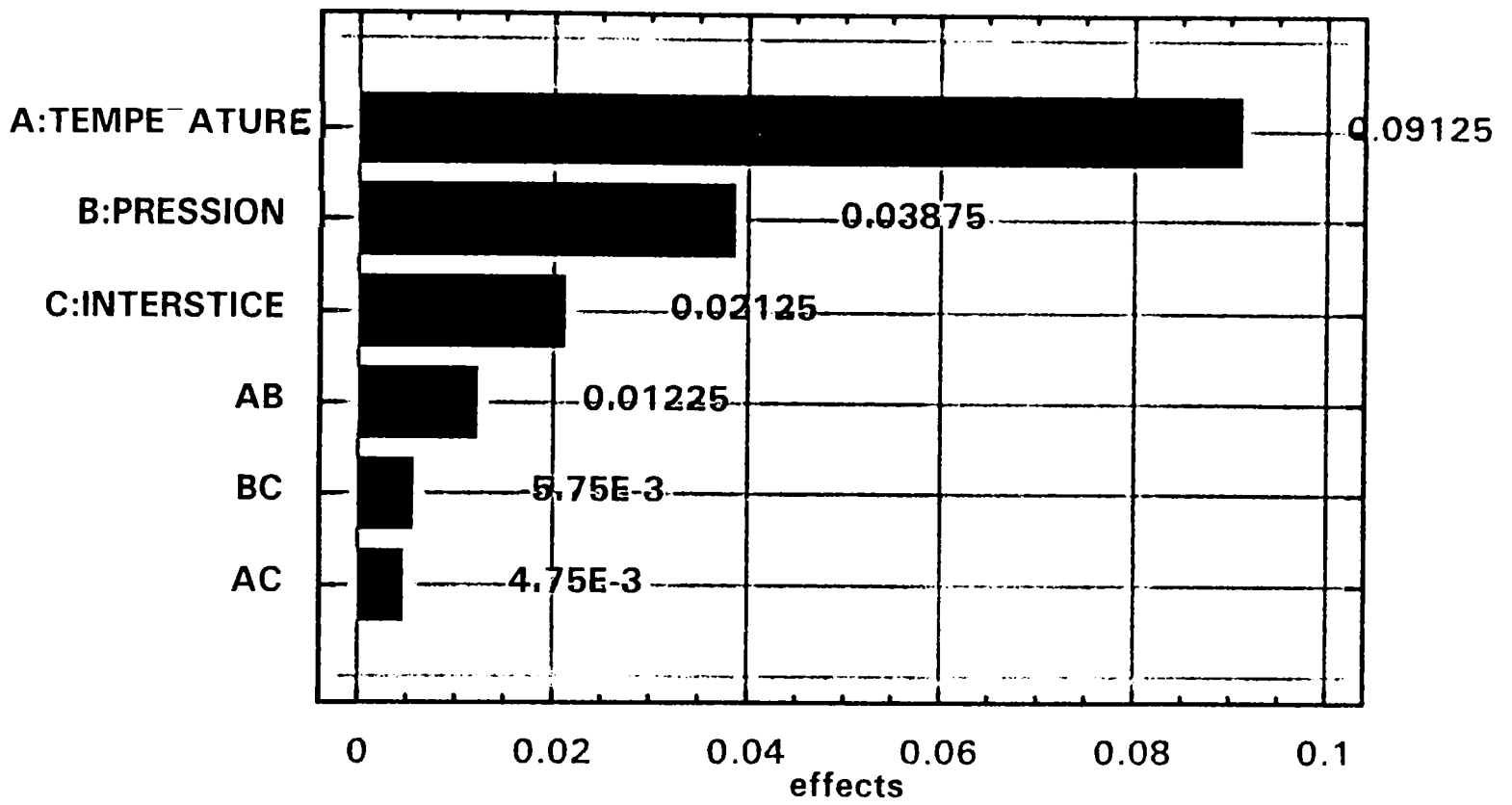
**Estimated effects    for QUANTITE - 3 factor study**

average	=	0.257111 +/- 1.53005E-3
A:    TEMPERATUR	=	0.09125 +/- 3.24572E-3
B:    PRESSION	=	0.03875 +/- 3.24572E-3
C:    INTERSTICE	=	0.02125 +/- 3.24572E-3
AB	=	0.01225 +/- 3.24572E-3
AC	=	4.75E-3 +/- 3.24572E-3
BC	=	-5.75E-3 +/- 3.24572E-3

Standard error estimated from total error with 2 d.f. (t = 4.30265)

**Tabel 7.1 Experiment factorial privind influența temperaturii presiunii și interstițiului de curgere asupra debitului extrudat în cazul polietilenei**

Pareto Chart for QUANTITE



Normal Probability Plot for QUANTITE

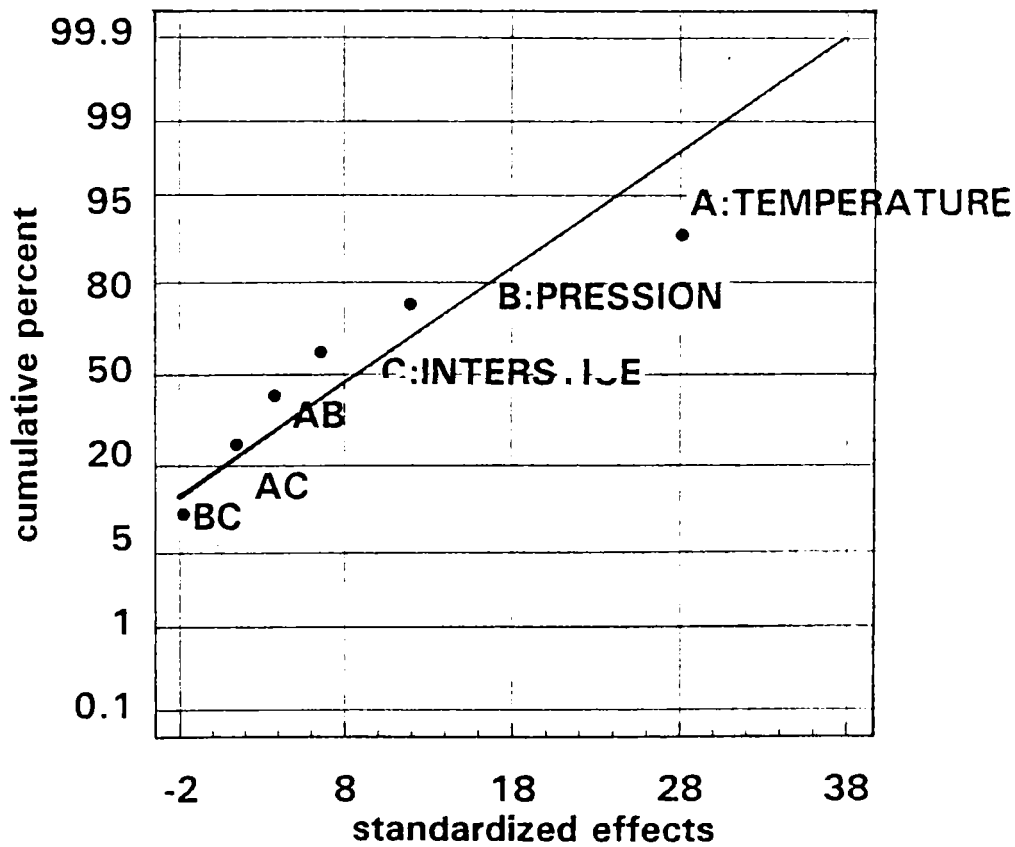


Figura 7.3 Influența temperaturii, presiunii și interstiului de curgere asupra debitului extrudat în cazul polietilenei

## 7.2. Incercari selective

### 7.2.1. Efectul activării ultrasonice asupra debitului extrudat.

Majoritatea modelelor matematice pentru studiul curgerii fluidelor iau în considerare, ca ipoteză simplificatoare, viteza de deplasare la perete ca fiind nulă. În cazul curgerii topiturilor de material polimeric, este acceptată însă ipoteza vitezei de deplasare nenule în vecinătatea peretelui ca urmare a comportamentului vasco-elastic al acestor fluide care determina apariția fenomenului de alunecare la perete a cărui intensitate se reflectă în creșterea debitului de material extrudat. Teoretic, acest fenomen al alunecării la perete se manifestă doar în zona II de curgere, figura 1.19, 1.21, după depășirea unei stări turbulente de curgere, și este dificil a fi cuantificat în mod direct. De aceea, ca și alți cercetători în domeniul reologiei, am abordat studiul într-o manieră indirectă, urmărind variațiile de debit extrudat cu și fără activare ultrasonică.

Ca prim pas pentru punerea în evidență a efectului activării ultrasonice asupra debitului extrudat s-a procedat la extrudarea polietilenei de joasa densitate, PEJD, folosind seturi duză - varf concentrator de parametru geometric  $2\alpha = 20^\circ$  la care interstițiul de curgere variază între limitele  $i_{\min} = 0,5 \text{ mm}$  (montaj fără inel de reglaj) și  $i_{\max} = 2,5 \text{ mm}$ , cu menținerea aproximativ constantă a cotei longitudinale pentru zona activată, figura 7.4.

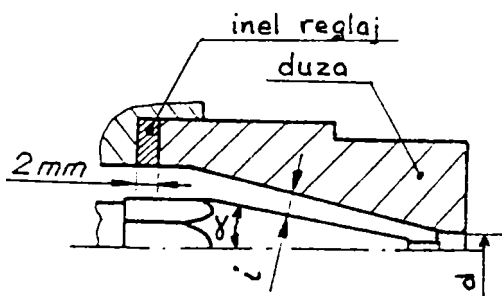


Figura 7.4

Pentru geometria menționată, adăugarea unui inel de reglaj de grosime  $e = 3 \text{ mm}$  determină majorarea interstițiului de curgere cu  $0,5 \text{ mm}$ . Cum nu se pot adăuga mai mult de 3-4 inele de reglaj, în reglajul la valori de interstițiu  $i > 2,5 \text{ mm}$ , pentru majorare interstițiului de curgere s-a procedat la înlocuirea duzei cu ansamblul ultrasonic folosind adausuri de distanțare plasate în sistemul

de prindere al acestui ansamblu. Sistemul de marcare-separare delimitează, la intervale regulate de timp (ex: 60 sec.), pe materialul ce iese prin orificiul calibrat, de diametru  $d$ , "tronsoane" ce au fost cântărite cu balanța analitică de laborator.

Deoarece valoarea temperaturii topiturii prezintă, inevitabil, ușoare variații ciclice cauzate de inerția termică a componentelor standului (figura 2.10), în scopul atenuării erorilor ce pot afecta rezultatele experimentale s-au preferat valori mari de timp de extrudare astfel încât rezultatele să exprime media comportării reologice a topiturii iar pentru fiecare set de condiții de lucru s-au executat alternativ probe fără activare apoi probe cu activare ultrasonică, aceasta alternanță repetându-se până la terminarea materialului, în condițiile de experimentare de tip A (figura 5.2),

tabel 7.2 și B, tabel 7.3. Valorile din aceste tabele reprezintă debitul extrudat, Q [g/min], temperatura topiturii de PEJD fiind T=165°C iar interstițiul de curgere, "i", variind între 0,5+2,5 mm

Tabel 7.2

$\frac{i}{\text{cm}}$	0,5NOUS	0,5US	0,95NOUS	0,95US	1,4NOUS	1,4US	1,76NOUS	1,76US	2,13NOUS	2,13US
0										
1	0.0560	0.1342	0.1675	0.4550	0.3366	0.7579	0.4511	0.95220	0.5515	1.1796
2	0.0553	0.1376	0.1671	0.4552	0.3176	0.7914	0.4538	1.0667	0.5615	1.1812
3	0.0578	0.1363	0.1728	0.4210	0.3175	0.7415	0.4604	0.96720	0.5906	1.1540
4	0.0571	0.1236	0.1671	0.4443	0.3318	0.7598	0.4508	1.0196	0.5200	1.1470
5	0.0573	0.1241	0.1670	0.4317	0.3342	0.7623	0.4430	0.98080	0.6081	1.1768
6	0.0565	0.1201	0.1728	0.4328	0.3281	0.7846	0.4811	1.0352	0.5205	1.1710
7	0.0548	0.1320	0.1695	0.4225	0.3208	0.7836	0.4882	0.98620	0.6031	1.1794
8	0.0551	0.1413	0.1678	0.4685	0.3324	0.7786	0.4625	1.0321	0.5497	1.1427
9	0.0558	0.1325	0.1733	0.4153	0.3230	0.7334	0.4760		0.6258	1.1512
10	0.0561	0.1271	0.1699	0.4358	0.3318	0.7449	0.4696		0.5427	
11		0.1342	0.1735		0.3226		0.4755		0.5378	
12		0.1376	0.1723		0.3261		0.4618		0.6012	
13		0.1363	0.1752		0.3239		0.4395			
14		0.1236	0.1680				0.4323			
15		0.1241	0.1750							
16		0.1201	0.1665							
17		0.1320								
18		0.1413								
19		0.1325								
20		0.1271								

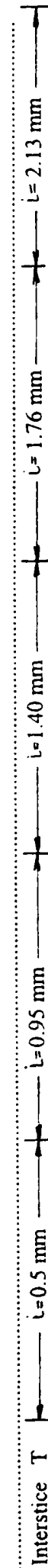
Tabel 7.3.

$\frac{i}{\text{cm}}$	0.5NOUS	0.5US	1.4NOUS/B	1.4NOUS/A	1.4NOUS	1.4USB	1.4USA	1.4US	1.76NOUS	1.76US
0										
1	0.0560	0.1342	0.6472	0.5732	0.6472	1.3769	1.1824	1.1824	1.3547	2.6390
2	0.0553	0.1376	0.6406	0.6046	0.6406	1.4125	1.1648	1.1648	1.4038	2.7213
3	0.0578	0.1363	0.6334	0.5600	0.6334	1.3276	1.2284	1.2284	1.3894	2.5980
4	0.0571	0.1236	0.6229	0.5960	0.6229	1.4922	1.2306	1.2306	1.3821	2.6960
5	0.0573	0.1241	0.6436	0.5760	0.6436	1.4112	1.2570	1.2570	1.3983	2.5694
6	0.0565	0.1201	0.6482	0.5827	0.6482	1.4619		1.3769	1.3580	2.7752
7	0.0548	0.1320	0.6455	0.5626	0.6455	1.3876		1.4125	1.3909	2.6159
8	0.0551	0.1413	0.6379		0.6379			1.3276	1.3443	2.8780
9	0.0558	0.1325	0.6290		0.6290			1.4922	1.3401	2.7205
10	0.0561	0.1271	0.6567		0.6567			1.4112	1.3475	2.7884
11			0.6294		0.6294			1.4619	1.3698	2.6255
12					0.5732			1.3876	1.3910	2.8127
13					0.6046				1.4105	2.5371
14					0.5600					
15					0.5960					
16					0.5760					
17					0.5827					
18					0.5626					

Tabel 7.4

**Experiment: PLASTIC + ULTRASONS / INTERSTICE, effet de surface et de conversion d'énergie**  
**Valeurs: débit extrudé en [gramme/60 sec]**

	T0.5NOUS	T0.5US	T0.95NOUS	T0.95US	T1.4NOUS	T1.4US	T1.76NOUS	T1.76US	T2.13NOUS	T2.13US
Minimum	0.0548	0.1201	0.1665	0.415300	0.3175	0.733399	0.4323	0.9522	0.519999	1.1427
Maximum	0.0577999	0.141299	0.1752	0.468499	0.33660	0.791400	0.488200	1.0667	0.62580001	1.1812
Sum	0.5618	2.6176	2.7253	4.3821	4.24640	7.638	6.4456	8.03999	6.8125001	10.4821
Points	10	20	16	10	13	10	14	8	12	9
Mean	0.05618	0.13088	0.17033125	0.43821	0.32664616	0.7638	0.4604	1.005	0.56770834	1.1648
Median	0.0560500	0.13225	0.1697	0.434299	0.326099	0.761050	0.4611	1.0029	0.55650002	1.171
RMS	0.056187882	0.13104321	0.17035837	0.43851459	0.32670287	0.76403806	0.46067259	1.0056728	0.56877556	1.1649
Std Deviation	0.00099196758	0.0067080149	0.0031391554	0.017225457	0.0063354303	0.020103068	0.016443611	0.03931968	0.036375078	0.015774
Variance	9.8399967e-07	4.4997464e-05	9.8542966e-06	0.0002967163	4.0137676e-05	0.000404133	0.00027039234	0.0015460	0.00132314	0.000248
Std Error	0.000313687	0.00149995	0.000784788	0.0054471678	0.00175713	0.00635714	0.0043947399	0.0139016	0.01050058	0.005258
Kurtosis	-1.1133539	-1.1694051	-1.5377252	-0.9908887	-1.2657435	-1.3373386	-0.93431125	-1.2110486	-1.376145	-1.6769



$\Delta Q_{60}(\text{RMS})$	133 %	157.4 %	133.8 %	118.3 %	104.83 %
$Q_{us}$ par rapport de $Q$	233 %	257.4 %	233.8 %	219.3 %	204.83 %

[T0.5NOUS = interstice = 0.5 mm, sans activation US

Q = débit normal extrudé,  $Q_{us}$  = débit d'extrusion à ultrasons

T0.5US = interstice = 0.5 mm, activation ultrasonique

$\Delta Q_{60}$  = augmentation du débit

$$\Delta Q_{60} = \frac{Q_{US} - Q}{Q} \cdot 100, [\%]$$

**Tabel 7.5**

**Experiment: PLASTIC + ULTRASONICS / seulement l'effet d- surface**  
**Valeurs: débit extrudé en [gramme/60 sec]**

	T0.5NOUS	T0.5US	T1.4NOUS/B	T1.4NOUS/A	T1.4NOUS	T1.4US/B	T1.4US/A	T1.4US	T1.76NOUS	T1.76US
Minimum	0.0548	0.1201	0.62290	0.56	0.56	1.3276	1.1648	1.1648	1.3401	2.5371
Maximum	0.057799	0.141299	0.65670	0.60460	0.65670	1.4922	1.257	1.4922	1.4105	2.878
Sum	0.5618	1.3088	7.0344	4.0551	11.0895	9.8699	6.0632	15.9331	17.8804	34.977
Points	10	10	11	7	18	7	5	12	13	13
Mean	0.05618	0.13088	0.63949091	0.5793	0.61608334	1.4099857	1.21264	1.3277583	1.3754154	2.6905385
Median	0.056050	0.13225	0.64060003	0.57599998	0.62920001	1.4112	1.2284	1.35225	1.3821	2.6960001
RMS	0.0561878	0.131043	0.63956287	0.57950095	0.61690071	1.4108894	1.2131134	1.3320562	1.3756123	2.6923665
Std Deviation	0.000991967	0.00689183	0.01006194	0.016482419	0.032666411	0.054536343	0.037887548	0.11167228	0.024224302	0.10324801
Variance	9.83999e-07	4.74973e-05	0.00010124	0.000271670	0.001067094	0.002974212	0.001435466	0.01247069	0.000586816	0.010660152
Std Error	0.00031368	0.00217938	0.00303379	0.006229769	0.007699547	0.0206128	0.016943827	0.03223701	0.006718612	0.028635846
Kurtosis	-1.1133539	-1.1694051	-0.8728543	-1.1408792	-1.2362696	-0.79158059	-1.4664079	-1.3821859	-1.4342137	-1.0128241

Interstice <.....i=0.5 mm.....> <.....i=1.40 mm.....> <.....i=1.76 mm.....>

$\Delta Q_{60}$  (RMS) 133 % 115.9 % (109.33 % pour la population A et 120.6% pour la population B) 95.76 %  
 $Q_{us}$  par rapport de  $Q$  233 % 215.9.4 % 195.76%

[T0.5NOUS = interstice = 0.5 mm, sans activation US

Q = débit normal extrudé,  $Q_{us}$ = débit d'extrusion à ultrasons

T0.5US = interstice = 0.5 mm, activation ultrasonique

$$\Delta Q_{60} = \frac{Q_{US} - Q}{Q} \cdot 100, [\%]$$

La prelucrarea statistică a rezultatelor, tabelele 7.4 și 7.5 s-au luat în considerare seturi de valori ale debitului extrudat realizate la extrudarea aceluiași material pentru condiții de reglaj invariabile, valorile extreme (minima și maxima) fiind eliminate.

Fluidele de lucru sunt vâsco-elastice, cu o vâscozitate mult mai mare decât a apei de aceea, după cum s-a constatat experimental, suprafața liberă de curgere influențează într-un mod deloc de neglijat comportarea reologica a topiturii. De aceea, la prelucrarea datelor experimentale s-a evitat utilizarea valorilor de debit extrudat (influențate de valoarea secțiunii libere de curgere) și s-a preferat raportarea debitului extrudat la valoarea suprafeței de curgere pentru eliminarea influenței acesteia. Valorile obținute, la care se vor face referiri sub denumirea de "debit redus"  $q = Q/S$ , au fost cele analizate la interpretarea rezultatelor astfel încât, ca indicator al modificărilor reologice induse se poate folosi creșterea relativă de debit redus

$$\text{calculat cu formula: } \Delta q(i) = \frac{Q_{\text{Usone}}(i) - Q_{\text{normal}}(i)}{Q_{\text{normal}}(i)} \cdot 100, [\%] \quad (7.1)$$

unde  $i$  = interstițiul de curgere.

În același mod au fost prelucrate rezultatele experimentale pentru extrudarea la presiune redusă,  $p = 5 \text{ atm}$ . a PEJD, PEID și PP cu și fără activare ultrasonică sinteza rezultatelor privind creșterea relativă de debit redus,  $\Delta q_A$  și  $\Delta q_B$ , pentru condițiile de experimentare de tip A și B, prezentate în capitolul 5 (figura 5.2) fiind prezentată în tabelul 7.6.

Tabel 7.6

Mat.	i [mm]	Deplasare axială conc. [mm] (numal pentru experiment A)	$\Delta q_A$ [%]	$\Delta q_B$ [%]	$\Delta q_A - \Delta q_B$ [%]	$\frac{\Delta q_A - \Delta q_B}{\Delta q_A}$ [%]	Temp. extrud [°C]	Diferența de temperatura la ieșire duza [°C]	
								$\Delta T_A$	$\Delta T_B$
PEJD	0,5	0,5	130,0	131,0	1	0	160	+ 73	+ 55
	<b>0,95</b>	<b>3,1</b>	<b>157,4</b>	141	16,4	9		<b>+ 78</b>	<b>+ 56</b>
	1,40	5,7	133,8	115,9	17,9	13,4		+ 67	+ 50
	1,76	7,8	118,3	95,76	22,54	19,5		+ 65	+ 47
	2,13	9,9	104,1	82	22,1	21		+ 73	+ 35
PEID	0,5	0,5	198	198	0	0	165	+ 62	+ 52
	<b>1,0</b>	<b>3,2</b>	<b>234</b>	205	29	12,4		<b>+ 68</b>	<b>+ 59</b>
	1,5	6,2	197	161	36	18,2		+ 59	+ 49
	2,5	11,5	169	133	36	21,3		+ 48	+ 32
PP	0,5	0,5	302	302	0	0	165	+ 60	+ 56
	<b>1,0</b>	<b>3,2</b>	<b>403</b>	336	62	15,4		<b>+ 63</b>	<b>+ 56</b>
	1,5	6,2	317	259	58	18,3		+ 56	+ 48
	2,5	11,5	197	151,5	46,5	<b>23,6</b>		+ 48	+ 34



Aceste valori pun în evidență faptul că debitul extrudat în condițiile activării ultrasonice este de 2,5 până la 5 ori valoarea debitului extrudat în condiții normale ca urmare a inducerea fenomenului de alunecare:

- $\Delta Q_A = 157\%$ , pentru PEJD, când interstițiul de curgere este de aproximativ 1 mm și suprafața frontală a concentratorului este retrasă cu 3,1 mm în interiorul duzei (raportat la secțiunea de ieșire din duza) aproximativ valoarea diametrului secțiunii de ieșire din duză;
- $\Delta Q_A = 403\%$ , pentru PP, în aceleași condiții de experimentare.

Rezultatele exprimă răspunsul materialului extrudat la activarea ultrasonică care modifică proprietățile interfeței de contact fluid-perete facilitând alunecarea la perete și sunt mult superioare creșterii relative de debit ( $\approx 20\%$ ) constatate în cazul extrudării prin filieră de cristal pe a cărei suprafață activă, de curgere, a fost greșit, în strat fin, tricolorosilan fluorat pentru a modifica natura materialului peretelui (și implicit a energiei de suprafață) în condițiile conservării rugozității suprafeței, El Kissi, [47].

Considerăm că diferențele mari de creștere relativă a debitului redus, în cazul celor două materiale PEJD și PP, sunt rezultatul cumulativ al diferențelor valorice ale energiei de suprafață și coeficientului de frecare aparentă precum și a modificărilor pe care aceste două mărimi caracteristice polimerilor analizate le suferă în timpul activării ultrasonice.

## Viteza de alunecare la perete

Dupa cum s-a arătat în capitolul 1.4, o anumită categorie de defecte ale pieselor din material plastic se datoreaza instabilității curgerii în procesele de punere în formă a topiturii de polimer.

Pentru produse realizate prin extrudare, diferitele tipuri de defecte caracteristice, mai mult sau mai puțin pronunțate, limitează în general productivitatea și sunt efectul curgerii în regim turbulent datorate perturbării distribuției de viteza caracteristice curgerii laminare astfel încât calitatea produsului extrudării reflectă, în mod indirect tipul curgerii (laminară sau nelaminară, cu diferite grade de turbulentă).

Modelele matematice clasice folosite în studiul analitic al curgerii topiturii, în general, se bazează pe ipoteza simplificatoare a vitezei (de deplasare a topiturii) nule la perete. După cum s-a constatat experimental (capitolul 1.4.1.3) diagramele de curgere scot în evidență existența a două domenii de curgere, figurile 1.19, 1.21,:

- zona I de curgere, în care, conform ipotezelor simplificatoare, viteza la perete este nula dar este acceptata și verificată ipoteza curgerii, în vecinătatea peretelui, cu o viteza nenula, de valoare constantă, dar de valoare mult mai mică în raport cu viteza medie de curgere a topiturii;
- zona de instabilitate a curgerii caracterizată de fluctuații ale presiunii și debitului extrudat;
- zona II de curgere, în care, pentru unele materiale procesate, debitul se poate stabili, dar la valori majorate de debit care indica viteze mari de deplasare a topiturii la perete.

Aceasta ultimă observație ne îndreptățește a considera că cele doua zone de curgere sunt expresia a două stări reologice distincte care sunt caracterizate de valori stabile ale vitezei de alunecare la perete și că tranziția între cele două stări, de stabilitate a vitezei de alunecare la perete, se face printr-un proces lent, caracterizat de variații ciclice ale debitului și presiunii ca urmare a variației vitezei de alunecare la perete după o schemă alternativă alunecare-adeziune (stik-slip) a cărei manifestare o constituie zona de instabilitate a curgerii.

Variațiile procentuale ale debitului redus,  $\Delta Q_A$  sau  $\Delta Q_B$  din tabelul 7.6, exprimă în mod direct, proporțional, variațiile de viteză de curgere la perete în cazul extrudării activate ultrasonic față de condițiile normale de extrudare.

### 7.2.2. Studiul activării ultrasonice ca factor de influență.

În baza datelor din tabelul 7.6 s-au trasat curbele de variație debit-interstițiu din figura 7.5 a căror analiză pune în evidență faptul ca în jurul unei aceleiași valori de interstițiu de curgere  $i \approx 1$  mm, debitele de material polimeric extrudat înregistrează valori maxime.

Deoarece eficacitatea rezultatelor experimentului factorial este mult mai bună în cazul evoluției monotone a variabilei răspuns, studiul comparativ al influenței activării ultrasonice asupra creșterii relative de debit redus în raport cu influența altor factori importanți determinanți: temperatură, presiune, interstițiu de curgere a fost abordat în cadrul a două experimente 2 factoriale, câte unul pentru fiecare ramură descendentă ( $i > 1$  mm) a curbelor debit interstițiu.

Condiții de derulare a acestor experimente, de extrudare a PEJD și PP - materiale în cazul cărora s-au constatat valorile extreme de răspuns la activarea ultrasonică, și limitele de variație a factorilor de influență în condițiile menținerii frontalului concentratorului retras cu 3 mm în interiorul duzei (poziție corespunzătoare creșterilor maxime de debit relativ):

- activare ultrasonica: 0 (Nu) și 1 (Da);
- presiune:  $p = 2 \div 5$  atm.;
- temperatura:  $T = 140 \div 165$  °C pentru PEJD și  $T = 150 \div 180$  °C pentru PP;
- interstițiu de curgere  $i = 1 \div 2,5$  mm, pentru ramura descendentă.

sunt prezentate în tabelul 7.7, etapele acestui experiment factorial redus, fiind stabilite cu ajutorul programului de analiza statistică Statgraphics.

Rezultatele experimentale precum și observații privind derularea experimentelor sunt prezentate în tabelul 7.8a și b. Interpretarea acestora utilizând StatGrafics ca program de analiza a rezultatelor experimentului factorial pune în evidență contribuția fiecărui factor de influență la modificarea variabilei de răspuns, rezultatele prelucrării statistice privind aportul celor 4 patru factori de influență la creșterea de debit fiind prezentate în figura 7.6.

Conform diagramelor din figura 7.6, se poate constata ca activarea ultrasonica are o influență comparabilă sau chiar mai mare decât a altor factori de influență importanți precum temperatura și presiunea, la a caror modificare se procedează, în mod convențional, pentru modificarea și menținerea controlului asupra comportării reologice a topiturii.

Nu sunt de neglijat nici interacțiunile de prim rang ale activării ultrasonice ca factor de influență cu ceilalți factori (presiune, temperatură) astfel încât luând în considerare influența directă sau combinată (de ordin I) activarea ultrasonica se impune ca modalitate (mijloc) de influențare a comportării reologice a topiturilor de polimer în procedeele de punere în forma , mai ales pentru valori mici de interstițiu de curgere,  $i \approx 1$  mm, figura 7.6.

Tabel 7.7a

Proiectare experiment factorial  $2^4$  pentru extrudarea polietilenei (PEJD)

Experim nr.	Valori de reglaj pentru factorii de influenta:				Observatii
	Temperatura, [°C]	Presiune, [atm]	Activare ultrasonica, [-]	Interstitiu, [mm]	
1	168	5	0	1 mm	experimentele 1÷8 pot fi folosite in mod independent pentru studiul influentei a trei factori: temperatura, presiune, activare ultrasonica, la extrudarea prin interstitiu $i = 1$ mm
2	142	5	0		
3	168	5	1		
4	142	5	1		
5	168	2	0		
6	142	2	0		
7	168	2	1		
8	142	2	1		
9	168	5	0	2,5 mm	experimentele 9÷16 pot fi folosite in mod independent pentru studiul influentei a trei factori: temperatura, presiune, activare ultrasonica, la extrudarea prin interstitiu $i = 2,5$ mm
10	142	5	0		
11	168	5	1		
12	142	5	1		
13	168	2	0		
14	142	2	0		
15	168	2	1		
16	142	2	1		

Tabel 7.7b

Proiectare experiment factorial  $2^4$  pentru extrudarea polipropilenei (PP)

Experim nr.	Valori de reglaj pentru factorii de influenta:				Observatii
	Temperatura, [°C]	Presiune, [atm]	Activare ultrasonica, [-]	Interstitiu, [mm]	
1	185	5	0	1 mm	experimentele 1÷8 pot fi folosite in mod independent pentru studiul influentei a trei factori: temperatura, presiune, activare ultrasonica, la extrudarea prin interstitiu $i = 1$ mm
2	150	5	0		
3	185	5	1		
4	150	5	1		
5	185	2	0		
6	150	2	0		
7	185	2	1		
8	150	2	1		
9	185	5	0	2,5 mm	experimentele 9÷16 pot fi folosite in mod independent pentru studiul influentei a trei factori: temperatura, presiune, activare ultrasonica, la extrudarea prin interstitiu $i = 2,5$ mm
10	150	5	0		
11	185	5	1		
12	150	5	1		
13	185	2	0		
14	150	2	0		
15	185	2	1		
16	150	2	1		

**Creșterea de debit  
în cazul activării ultrasonice  
(experimente de tip A și B)**

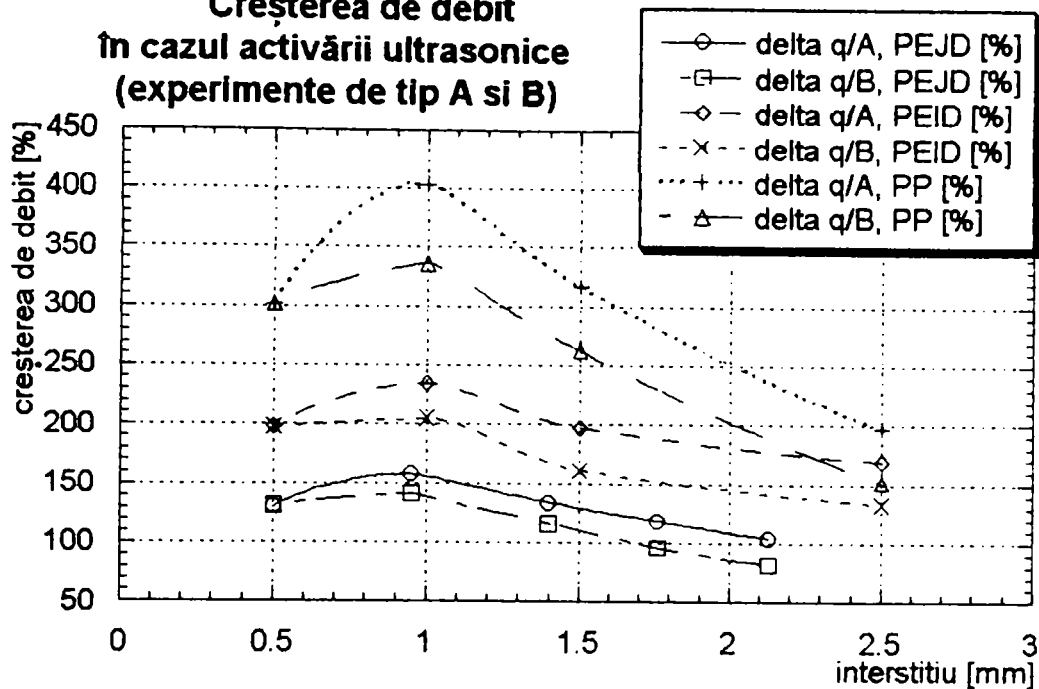


Figura 7.5 Creșteri de debite funcție de interstiiu de curgere

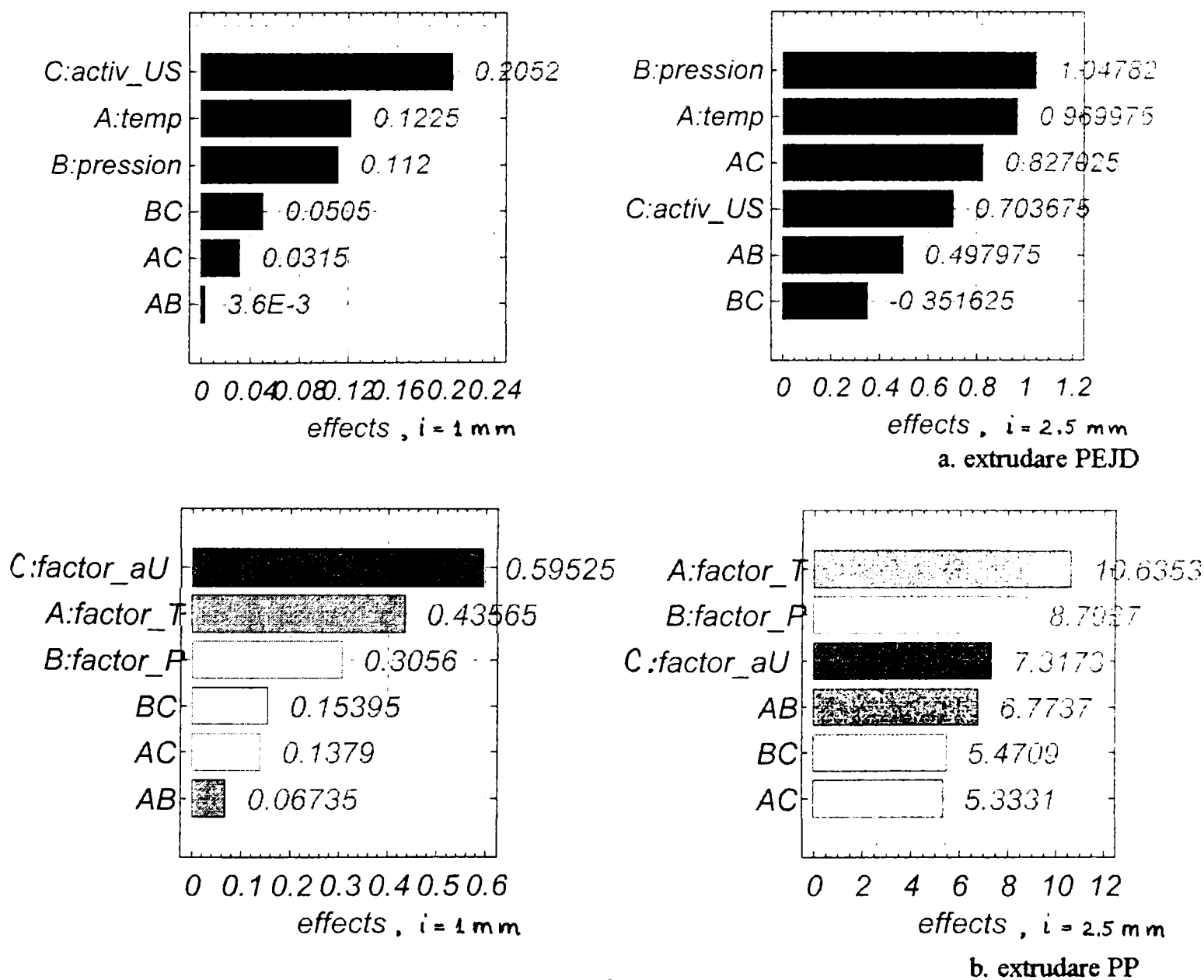


Figura 7.6

Material: PEJD		Parametrii de reglaj: $T_{min}(T<) = 142\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $T_{max}(T>) = 168\text{ }^{\circ}\text{C}$ $p_{min}(p<) = 2\text{ atm}$ , $p_{max}(p>) = 5\text{ atm}$ interstitiu de curgere $l = 1\text{ mm}$ supraf. libera de curgere $S = 9,62\text{ mm}^2$	
Conditii de experimentare: experiment de tip A, frontal concentrator retras 3 mm in duza, diam. front. conc.=2,5 mm, diam. iesire duza = 3,5 mm			
T= 168 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 168 °C	valori inregistrate: 0,2230 g/min 0,2281 g/min 0,2289 g/min 0,450 g/120 s	T= 142 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 140 °C	valori inregistrate: 0,2583 g/120 s 0,2526 g/120 s 0,2488 g/120 s
<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,2260 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,1266 g/min</b>
T= 168 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 237 °C	valori inregistrate: 0,5261 g/min 0,5012 g/min 0,5108 g/min 0,4956 g/min	T= 142 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 199 °C	valori inregistrate: 0,3518 g/min 0,3751 g/min 0,3313 g/min 0,3643 g/min
<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - material supraincalzit, galben, foarte fluid - umflare extrudat la iesirea din duza	valoare medie: <b>0,5084 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - umflare extrudat la iesirea din duza	valoare medie: <b>0,3556 g/min</b>
T= 168 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 165 °C	valori inregistrate: 0,3064 g/120 s 0,3141 g/120 s 0,3131 g/120 s 0,3159 g/120 s	T= 142 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 140 °C	valori inregistrate: 0,1466 g/120 s 0,1442 g/120 s 0,1480 g/120 s 0,1472 g/120 s 0,1492 g/120 s
<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,1561 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,0735 g/min</b>
T= 168 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 226 °C	valori inregistrate: 0,3344 g/min 0,3603 g/min 0,3122 g/min 0,4062 g/min 0,3226 g/min	T= 142 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 193 °C	valori inregistrate: 0,1889 g/min 0,1831 g/min 0,1877 g/min 0,2004 g/min 0,1997 g/min
<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere turbulenta - material foarte fluid	valoare medie: <b>0,3471 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere laminara	valoare medie: <b>0,1919 g/min</b>

Tabel 7.8a (continuare)

Material: PEJD		Parametrii de reglaj:	
Conditii de experimentare: experiment de tip A, frontal concentrator retras 3 mm in duza, diam. front. conc.=2,5 mm, diam. iesire duza = 6,5 mm		$T_{min} (T<) = 142 \text{ }^\circ\text{C}$ , $T_{max} (T>) = 168 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_{min} (p<) = 2 \text{ atm}$ , $P_{max} (p>) = 5 \text{ atm}$ Interstitiu de curgere $l = 2,5 \text{ mm}$ supraf. libera de curgere $S = 33,18 \text{ mm}^2$	
T= 168 °C  P= 5 atm  T <sub>mat</sub> = 168 °C <b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valori inregistrate: 1,1318 g/30 s 1,0976 g/30 s 1,0923 g/30 s 1,0804 g/30 s 1,0627 g/30 s ----- valoare medie: <b>2,1859 g/min</b>	T= 142 °C  P= 5 atm  T <sub>mat</sub> = 140 °C <b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valori inregistrate: 0,9409 g/30 s 0,9497 g/30 s 0,9546 g/30 s 0,9567 g/30 s ----- valoare medie: <b>1,900 g/min</b>
T= 168 °C  P= 5 atm  T <sub>mat</sub> = 235 °C <b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - material supraincalzit, galben, foarte fluid - umflare extrudat la iesirea din duza	valori inregistrate: 1,8030 g/30 s 1,8865 g/30 s 1,8904 g/30 s ----- valoare medie: <b>3,720 g/min</b>	T= 142 °C  P= 5 atm  T <sub>mat</sub> = 199 °C <b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere normala, neperturbata	valori inregistrate: 0,5573 g/30 s 0,5029 g/30 s 0,5356 g/30 s 0,5445 g/30 s ----- valoare medie: <b>1,070 g/min</b>
T= 168 °C  P= 2 atm  T <sub>mat</sub> = 165 °C <b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valori inregistrate: 1,1326 g/min 1,1282 g/min 1,1305 g/min ----- valoare medie: <b>1,1304 g/min</b>	T= 142 °C  P= 2 atm  T <sub>mat</sub> = 140 °C <b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valori inregistrate: 0,6331 g/min 0,6363 g/min 0,6611 g/min ----- valoare medie: <b>0,6435 g/min</b>
T= 168 °C  P= 2 atm  T <sub>mat</sub> = 231 °C <b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere turbulenta - material foarte fluid, evazare la iesirea din duza	valori inregistrate: 2,1944 g/min 1,1083 g/30 s 1,0389 g/30 s ----- valoare medie: <b>2,1708 g/min</b>	T= 142 °C  P= 2 atm  T <sub>mat</sub> = 203 °C <b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - umflare extrudat la iesirea din duza (evazare)	valori inregistrate: 0,6294 g/30 s 0,6169 g/30 s 0,5991 g/30 s 0,6082 g/30 s ----- valoare medie: <b>1,2268 g/min</b>

Material: PP		Parametrii de reglaj: $T_{min}(T<) = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $T_{max}(T>) = 187\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{min}(p<) = 2\text{ atm}$ , $P_{max}(p>) = 5\text{ atm}$ interstitiu de curgere $i = 1\text{ mm}$ supraf. libera de curgere $S = 9,62\text{ mm}^2$	
Conditii de experimentare: experiment de tip A, frontal concentrator retras 3 mm in duza, diam. front. conc.=2,5 mm, diam. iesire duza = 3,5 mm			
T= 187 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 184 °C	valori inregistrate: 0,5158 g/min 0,5072 g/min 0,5184 g/min 0,5074 g/120 s	T= 150 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 140 °C	valori inregistrate: 0,1540 g/min 0,1658 g/min 0,1553 g/min 0,1493 g/min 0,1550 g/min
<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,5122 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,1559 g/min</b>
T= 187 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 225 °C	valori inregistrate: 0,7059 g/30 s 0,7235 g/30 s 0,6753 g/30 s	T= 150 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 197 °C	valori inregistrate: 0,7990 g/min 0,7652 g/min 0,8240 g/min 0,6883 g/min
<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - material foarte fluid	valoare medie: <b>1,4031 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - material foarte fluid - curgere perturbata	valoare medie: <b>0,7684 g/min</b>
T= 187 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 186 °C	valori inregistrate: 0,1458 g/30 s 0,1485 g/30 s 0,1498 g/30 s 0,1531 g/30 s 0,1471 g/30 s	T= 150 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 144 °C	valori inregistrate: 0,0731 g/min 0,745 g/min 0,0711 g/min 0,0764 g/min
<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,2971 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,0738 g/min</b>
T= 187 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 234 °C	valori inregistrate: 0,3925 g/30 s 0,3920 g/30 s 0,5792 g/30 s 0,4012 g/30 s	T= 150 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 205 °C	valori inregistrate: 0,3900 g/min 0,4126 g/min 0,3314 g/min 0,3770 g/min
<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere turbulenta - material foarte fluid, se trage in fire	valoare medie: <b>0,8824 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,378 g/min</b>



Tabel 7.8b (continuare)

Material: PP		Parametrii de reglaj: $T_{\min}(T<) = 152\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $T_{\max}(T>) = 185\text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{\min}(p<) = 2\text{ atm}$ , $P_{\max}(p>) = 5\text{ atm}$ interstitiu de curgere $i = 2,5\text{ mm}$ supraf. libera de curgere $S = 33,18\text{ mm}^2$	
Conditii de experimentare: experiment de tip A, frontal concentrator retras 3 mm in duza, diam. front. conc.=2,5 mm, diam. iesire duza = 6,5 mm			
T= 185 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 181 °C	valori inregistrate: 3,6965 g/30 s 5,1907 g/30 s 4,2440 g/30 s 4,640 g/30 s	T= 152 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 145 °C	valori inregistrate: 0,3478 g/30 s 0,3380 g/30 s 0,4460 g/30 s 0,5155 g/30 s
<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>8,886 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>0,8148 g/min</b>
T= 185 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 248 °C	valori inregistrate: 15,4 g/30 s 15,29 g/30 s 15,83 g/30 s	T= 152 °C P= 5 atm T <sub>mat</sub> = 189 °C	valori inregistrate: 2,2306 g/30 s 2,2084 g/30 s 1,9688 g/30 s
<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - material supraincalzit, galben, foarte fluid	valoare medie: <b>31,012 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere perturbata - material foarte fluid	valoare medie: <b>4,2652 g/min</b>
T= 185 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 182 °C	valori inregistrate: 1,2980 g/30 s 1,3372 g/30 s 1,3977 g/30 s 1,3574 g/30 s	T= 152 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 148 °C	valori inregistrate: 1,1440 g/min 1,1990 g/min 1,3284 g/min 1,1445 g/min
<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>2,6952 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - fara activare ultrasonica - curgere laminara - extrudat fara defecte	valoare medie: <b>1,2039 g/min</b>
T= 185 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 234 °C	valori inregistrate: 2,7973 g/30 s 2,9588 g/30 s 3,0320 g/30 s 2,8610 g/30 s	T= 152 °C P= 2 atm T <sub>mat</sub> = 203 °C	valori inregistrate: 1,8268 g/30 s 3,7634 g/min 3,3803 g/min 3,5437 g/min
<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - curgere turbulenta - material foarte fluid	valoare medie: <b>5,820 g/min</b>	<b>Observatii :</b> - cu activare ultrasonica - umflare extrudat la iesirea din duza (evazare)	valoare medie: <b>3,5852 g/min</b>

### 7.2.3. Efectul de suprafață în cazul activării ultrasonice

Comportarea reologică a topiturii de polimer prin secțiunea transversală a filierei de extrudare este influențată de mai mulți parametri dintre care un rol hotărâtor îl au rugozitatea și energia de suprafață a topiturii, deci interacțiunile susceptibile a se dezvolta la interfața polimer topit-peretele secțiunii de curgere.

După cum s-a aratat în capitolul 1, numeroase programe de studiu experimental precum cele ale cercetătorilor El Kissi, Ramamurthy, De Smet și Nam au fost orientate în scopul identificării efectelor induse de modificarea proprietăților interfeței de contact fluid-perete asupra comportării reologice ale topiturilor de polimer.

Același scop definește programul de cercetare pe care l-am abordat, dar modificările de comportament reologic în condițiile modificării interacțiunii fluid-perete, la nivelul interfeței de contact, au fost provocate într-un mod mai puțin convențional, utilizând efectele susceptibile a se manifesta în cazul activării ultrasonice a peretelui:

E1: efectul de suprafață – pus în evidență pe suprafața laterală a concentratorului în contact cu fluidul sub presiune. Consta în reducerea frecării la nivelul acestei suprafețe laterale,  $S_L$ , figura 7.7, și determină creșterea vitezei aparente de curgere la perete, a vitezei medii de curgere și a debitului;

E2: efectul termo-acustic – constă în încălzirea materialului parcurs de unda ultrasonică ca urmare a absorbției energiei acesteia în zonele de discontinuitate a mediului, la nivelul suprafețelor (interfețe) laterale,  $S_L$ , și frontale,  $S_F$ , ale concentratorului în contact cu topitura, figura 7.7.

În cazul particular al materialelor polimerice semicristaline vitrificate, creșterea de temperatură este rezultatul atât al frecărilor interne suplimentare induse de către activarea ultrasonică prin stimularea mecanică ciclică a macromoleculi mobilizate (sau semimobilizate) cât și a conversiei energiei ultraacustice în energie termică la nivelul discontinuității mediului incomplet topit, dacă temperatura topiturii  $T$  nu depășește temperatura de fuziune,  $T_v < T < T_f$

Ca urmare a manifestării efectelor mai sus menționate, temperatura topiturii crește, calitățile reologice ale topiturii se modifică constatându-se o diminuare a vâscozității aparente și creșterea vitezei de curgere, așa cum arată rezultatele experimentale prezentate în tabelul 7.6.

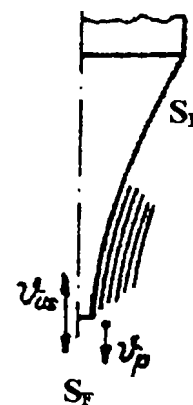


Figura 7.7

Tinând seama de particularitățile procedurii de prelucrare prin extrudare, de condițiile de manifestare a efectelor activării ultrasonice și analizând condițiile de experimentare de tip A și B prezentate în capitolul 5, considerăm că sunt justificate următoarele observații:

- în cazul utilizării configurației de extrudare caracteristică experimentului de tip A fluidul sub presiune este în contact cu concentratorul pe întreaga suprafață expusă ( $S_L + S_F$ ) astfel încât se manifestă efectul de suprafață E1 la nivelul suprafeței laterale a concentratorului,  $S_L$ , și efectul termo-acustic E2 la nivelul suprafețelor laterale,  $S_L$ , și frontale,  $S_F$  (spațiul din fața secțiunii frontale a concentratorului este ocupat de fluid sub presiune, care încă nu a ieșit prin duza de extrudare);
- pentru ansamblul duza-concentrator de configurație proprie experimentului de tip B doar suprafața laterală a concentratorului este supusă presiunii fluidului. Se manifestă efectul de suprafață E1 la nivelul suprafeței laterale a concentratorului,  $S_L$ , și efectul termo-acustic E2 în exclusivitate la nivelul suprafeței laterale,  $S_L$  (suprafața frontală a concentratorului nu mai este supusă presiunii fluidului deja extrudat).

Se poate considera, astfel, ca diferențele procentuale  $\Delta Q_A - \Delta Q_B$  din tabelul 7.6 sunt măsura efectului termo-acustic, E2, manifestat la nivelul suprafeței frontale a concentratorului,  $S_F$ , pentru condiții de experimentare corespunzătoare retragerii progresive a acestuia spre interiorul duzei de extrudare.

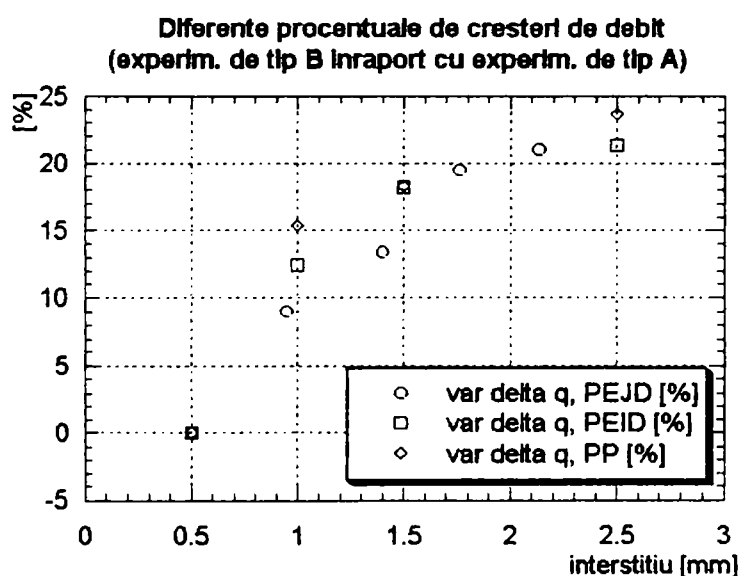


Figura 7.8 Diferențe procentuale de debit la extrudarea PEJD, PEID și PP în condițiile retragerii progresive a frontalului concentratorului în duza.

Analiza reprezentării grafice a acestor valori, figura 7.8, pune în evidență convergența contribuției pe care efectul termo-acustic o are în creșterea debitului, spre o valoare de 25% (raportat la debitul normal extrudat, fără activare ultrasonică).

Diferența de 75% din creșterea de debit poate fi atribuită manifestării, în sinergie, a efectelor specifice activării ultrasonice la nivelul suprafeței laterale a concentratorului care induce o modificare a profilului vitezei de curgere:

- diminuarea energiei de suprafață și favorizarea alunecării la perete prin reducerea coeficientului aparent de frecare (efect lubrifiant);

- scăderea vâscozității materialului procesat în vecinătatea peretelui ca urmare a creșterii locale temperaturii topiturii.

În cazul extrudării clasice, materialul topit, datorită energiei de suprafață ce îl caracterizează și eventualei scăderi de temperatura la contactul cu solidul, aderă (sau "se lipește") la peretele canalului de curgere.

Activarea ultrasonică, prin efectul termo-acustic indus la nivelul suprafeței laterale de contact cu fluidul, provoacă formarea unui strat fin de material supraîncălzit, de vâscozitate mult redusă în raport cu vâscozitatea volumului topiturii, cu proprietăți lubrifiante care favorizează transferul de material prin secțiunea de curgere.

Efectul de suprafață ce se manifestă la nivelul aceleiași suprafețe a concentratorului, atât în cazul experimentărilor de tip A cât și a celor de tip B favorizează desprinderea topiturii de perete astfel încât majorarea de debit este accentuată fără a induce apariția variațiilor oscilatorii de debit la ieșirea din filieră (defecte de extrudare).

Aceste două efecte manifestate în cazul activării ultrasonice a fluidelor vâscoase sub presiune în situația în care concentratorul este "imersat" în fluidul activat, se suprapun și sunt inseparabile la nivelul suprafeței laterale a concentratorului motiv pentru care considerăm oportună desemnarea acestei sinergii, cu efect direct asupra proprietăților reologice aparente ale fluidului, sub numele de "*efect ultrasonic termo-pelicular*".

Precizia temporizării sistemului de separare, de nivel valoric +/- 0.5% ( $\Delta t = 1\%$ ), ar putea influența rezultatele valoarea rezultatelor experimentale dar ținând seama de ordinul de mărime al creșterii relative de debit (100 ÷ 400%) în cazul activării ultrasonice, se poate concluziona că rezultatele scot în evidență eficacitatea reală a activării ultraacustice mai ales pentru cazuri în care materialul este obligat să treacă prin secțiuni înguste (interstițiu de curgere  $t = 1 \div 1,5$  mm) în care ponderea secțiunii peliculei (termo)lubrifiante este importantă.

În cazul aplicării unei activări ultrasonice de putere majorată, peste 100 W, este de așteptat creșterea în continuare a debitului relativ de material extrudat ca expresie a diminuării vâscozității aparente (fără a utiliza elemente de încălzire rezistive, clasice) consecință a manifestării efectelor cumulate de suprafață și de încălzire locală.

#### 7.2.4. Efectul termic al activării ultrasonice

După cum s-a arătat în subcapitolul precedent, prin analiza variabilei de răspuns *variație de debit extrudat*, rezultatele efectului termo-acustic nu pot fi decelate de cele ale efectului de suprafață decât într-o manieră indirectă și la nivelul suprafeței frontale a concentratorului, dar, cu siguranță, creșterea temperaturii extrudatului, tabelul 7.6, nu poate fi atribuită decât efectului termo-acustic manifestat fie la nivelul suprafeței  $S_L$ , fie pe întreaga suprafață a concentratorului,  $S_L+S_F$ , funcție de tipul experimentului.

După cum se poate constata, majorarea temperaturii extrudatului la ieșirea din duză, ca urmare a activării ultrasonice, variază în raport cu interstiul de curgere și materialul supus studiului dar valorile maxime:

$\Delta T \approx 78^\circ\text{C}$ , pentru polietilena PEJD,

$\Delta T \approx 68^\circ\text{C}$ , pentru polietilena PEID,

și  $\Delta T \approx 63^\circ\text{C}$ , pentru polipropilena PP

se constată pentru interstii de curgere  $i \approx 1$  mm și retrageri  $a \approx 3$  mm ale concentratorului în duza de extrudare.

Conform diagramelor Pareto din figura 7.6 a și b, temperatura topiturii este un factor de influență cu un aport hotărâtor în ceea ce privește efectul asupra proprietăților reologice ale topiturii. Ținând seama de aceasta și de similitudinea comportării diferitelor materiale polimerice la activarea ultrasonica, subcapitolele 7.2.1 și 7.2.2, pentru aprofundarea studiului factorilor de influență am procedat la extrudarea polipropilenei, PP, și polietilenei de joasă densitate, PEJD, ca materiale reprezentative – cu cea mai mare, respectiv cea mai mică creștere de debit relativ, în următoarele condiții de experimentare:

- activare ultrasonică: 0 (Nu) și 1 (Da);
- presiune:  $p = 2 \div 5$  atm.;
- temperatura: variabilă pentru fiecare set de condiții de lucru în domeniul  $T=115 \div 185^\circ\text{C}$
- interstiul de curgere  $i = 1 \div 3,5$  mm (pentru ramura descendentă a curbelor de debit) și diametrul de ieșire din duza de extrudare  $d = 3,5 \div 6,5$  mm în condiții precizate în tabelul 7.9.

Au fost determinate valorile următoarelor variabile-răspuns: temperatura extrudatului la ieșirea din duză și debitul extrudat, cu și fără activare ultrasonica, după metodologia de lucru folosită la experimentările anterioare, rezultatele experimentale fiind prezentate în tabelul 7.9.

Tabelul 7.9 (continuare)

Polipropilena, $d_0 = 3,5$ mm, $p = 5$ atm, $i = 1,5$ mm, exp. de tip A, $a = 3$ mm (figura 5.2)							
Temp. topiturii [°C]	Debit extrudat, [g/min] $Q_n$		Debit redus [g/mm <sup>2</sup> /min] $Q_{rs}$		Temperatura extrudatului la iesirea din filiera, [°C]		$\frac{Q_{rs} - Q_n}{Q_n} \cdot 100$ [%]
	conditii normale	cu activare ultrasonica	conditii normale	cu activare ultrasonica	Extrudare clasica	Extrudare activata US	
170	0,9006	2,7658	0,09361	0,28748	167,5	232	207
160	0,7537	2,6217	0,078336	0,2725	158	221	248
150	0,5321	2,2354	0,05531	0,23235	149	211	320
145	0,4263	1,8763	0,04431	0,19502	143,5	208	340
138	0,2406	1,0748	0,02501	0,11171	133	195	346,5
125	0,1715	0,6198	0,01783	0,06442	122	185	261,5
120	0,1166	0,369	0,012117	0,03836	115	178	216,5
$\Delta T \approx 63$ °C							

Tabelul 7.9 (continuare)

Polipropilena, $d_0 = 6,5$ mm, $p = 2$ atm, $i = 2,5$ mm, exp. de tip B (figura 5.2)							
Temp. topiturii [°C]	Debit extrudat, [g/min] $Q_n$		Debit redus [g/mm <sup>2</sup> /min] $Q_{rs}$		Temperatura extrudatului la iesirea din filiera, [°C]		$\frac{Q_{rs} - Q_n}{Q_n} \cdot 100$ [%]
	conditii normale	cu activare ultrasonica	conditii normale	cu activare ultrasonica	Extrudare clasica	Extrudare activata US	
185	2,783	5,969	0,0886	0,1900	185	224	114,5
160	1,546	4,1579	0,0492	0,13235	158	200	169
150	1,21	3,6285	0,0385	0,1155	148,5	190,5	200
145	0,8438	2,6775	0,02686	0,085228	143	184	217,5
138	0,5495	1,6730	0,01749	0,053253	136	176,5	204,5
125	0,4152	0,8274	0,013216	0,026337	124	162	99,5
115	-	0,3294	-	0,010485	-	148	-
$\Delta T \approx 40$ °C							

Tabelul 7.9 (continuare)

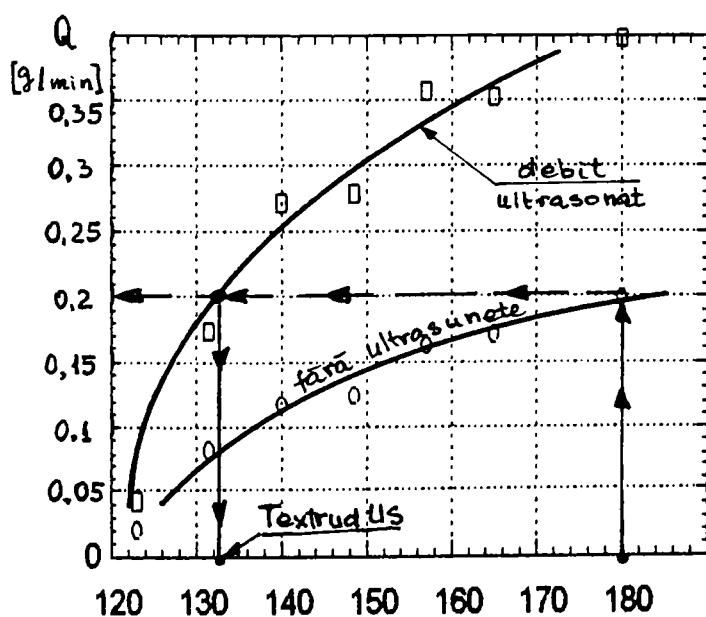
Polipropilena, $d_0 = 6,5$ mm, $p = 2$ atm, $i = 3,5$ mm, exp. de tip A, $a = 6$ mm (figura 5.2)							
Temp. topiturii [°C]	Debit extrudat, [g/min] $Q_n$		Debit redus [g/mm <sup>2</sup> /min] $Q_{rs}$		Temperatura extrudatului la iesirea din filiera, [°C]		$\frac{Q_{rs} - Q_n}{Q_n} \cdot 100$ [%]
	conditii normale	cu activare ultrasonica	conditii normale	cu activare ultrasonica	Extrudare clasica	Extrudare activata US	
175	4,387	5,9597	0,13221	0,17960	175	231	36
165	3,859	5,6096	0,11630	0,16905	164	218	45,5
161	3,600	5,3226	0,10850	0,16040	158	213,5	48
158	3,078	5,0106	0,092752	0,1510	156	213	63
148	2,829	4,6688	0,085268	0,14070	145	201,5	65
138	2,42	3,972	0,072934	0,11970	134	190	64
130	1,623	2,575	0,048925	0,07760	128	181	58,5
124	0,995	1,3207	0,029979	0,03980	118	176	33
$\Delta T \approx 56$ °C							

Tabelul 7.9 (continuare)

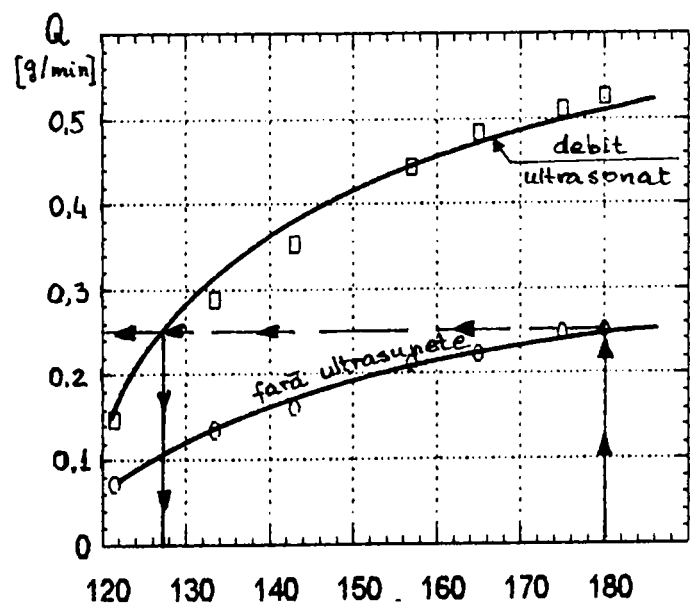
Polietilena PEJD, $d_0 = 3,5$ mm, $p = 5$ atm, $i = 1,5$ mm, exp. de tip A, $a = 3$ mm (figura 5.2)							
Temp. topiturii [°C]	Debit extrudat, [g/min] $Q_a$		Debit redus [g/mm <sup>2</sup> /min] $Q_{US}$		Temperatura extrudatului la iesirea din filiera, [°C]		$\frac{Q_{US} - Q_c}{Q_c} \cdot 100$ [%]
	conditii normale	cu activare ultrasonica	conditii normale	cu activare ultrasonica	Extrudare clasica	Extrudare activata US	
180	0,2505	0,5250	0,02604	0,05457	178	259	110
175	0,2472	0,5119	0,02569	0,05321	174	254	107
165	0,2230	0,4837	0,02318	0,05028	163	244	117
157	0,21244	0,4427	0,02208	0,04602	155	225	109
143	0,16018	0,3544	0,01665	0,03683	140	219	121,5
133,5	0,1344	0,2885	0,01397	0,02998	129	208	114
121,5	0,07131	0,1487	0,00741	0,01545	117	196	108
$\Delta T \approx 80$ °C							

Tabelul 7.9 (continuare)

Polietilena PEJD, $d_0 = 3,5$ mm, $p = 5$ atm, $i = 1,0$ mm, exp. de tip B (figura 5.2)							
Temp. topiturii [°C]	Debit extrudat, [g/min] $Q_a$		Debit redus [g/mm <sup>2</sup> /min] $Q_{US}$		Temperatura extrudatului la iesirea din filiera, [°C]		$\frac{Q_{US} - Q_c}{Q_c} \cdot 100$ [%]
	conditii normale	cu activare ultrasonica	conditii normale	cu activare ultrasonica	Extrudare clasica	Extrudare activata US	
180	0,1987	0,3974	0,02065	0,04027	178	248	100
165	0,1701	0,3521	0,01768	0,03660	163	234	107
157	0,1616	0,3571	0,01680	0,03712	154	223	121
148,5	0,1239	0,2787	0,01287	0,02897	145	213	125
140	0,1178	0,2721	0,01224	0,02828	136	206	131
131,5	0,0823	0,1736	0,00855	0,01804	127	200	111
123	0,0204	0,0418	0,00212	0,00434	118	188	105
$\Delta T \approx 69,5$ °C							



a. Polietilena PEJD,  $d_0 = 3,5$  mm,  $p = 5$  atm,  $i = 1,0$  mm, exp. de tip B (figura 5.2)



b. Polietilena PEJD,  $d_0 = 3,5$  mm,  $p = 5$  atm,  $i = 1,5$  mm, exp. de tip A,  $a = 3$  mm (figura 5.2)

Figura 7.9 Variatia debitului functie de temperatura

Rezultatele experimentale sunt în concordanță cu datele prezentate în tabelul 7.6 și cu concluziile anterioare privind creșterea de temperatură asociată activării ultrasonice și se poate constata că pentru mai multe valori ale temperaturii topiturii, păstrând neschimbate condițiile de lucru, aportul termic al activării ultrasonice este constant, figura 7.10 și tabelul 7.9, astfel încât temperatura extrudatului activat ultrasonic urmărește evoluția temperaturii topiturii, diferența dintre ele fiind  $\Delta T \pm (2 \div 3^\circ\text{C})$ . Aceste variații, în limite foarte apropiate ( $1 \div 5^\circ\text{C}$ ), pot fi puse pe seama inerției termice a elementelor componente ale standului și pe seama funcționării intermitente, ciclice, a sistemului de termostatare, variația temperaturii standului de experimentare urmărind o lege de evoluție sinusoidală, figura 2.10, ca de altfel în cazul tuturor dispozitivelor de punere în formă a materialelor polimerice.

Creșterile de temperatură fiind importante s determina formarea unei pelicule lubrifiante în vecinătatea peretelui motiv pentru care se prefigurează două aplicații practice ale efectului termic al activării ultrasonice:

- reducerea consumului energetic al elementelor de încălzire ale duzei sau chiar eliminarea acestora;
- reprezentarea grafică a valorilor de debit funcție de temperatura topiturii, pentru polietilena, arată că în baza efectului termo-pelicular există posibilitatea ca la o temperatură mai scăzută, în condițiile activării ultrasonice, să se obțină același debit de material extrudat ca și în cazul extrudării clasice, figurile 7.9a și b. Concluzia poate fi generalizată și pentru polipropilena, așa cum demonstrează rezultatele experimentale înscrise în tabelul 7.9.

Se constată că valorile maxime ale creșterii de debit, figura 7.11, sunt în vecinătatea temperaturilor de amorsare a topirii zonelor amorfe ale volumului materialului polimeric.

Pentru PP, aceste valori de temperatura, puse în evidență de curbele DSC din figura 7.12b, sunt  $T = 120 \dots 125^\circ\text{C}$ .

Pentru PEJD, conform diagramei DSC din figura 7.12a, temperatura de amorsare a tranziției spre starea vitroasă trebuie să fie  $T = 100 \dots 105^\circ\text{C}$ . Experimental se constată declanșarea curgerii topiturii de polietilena începând de la  $115 \dots 120^\circ\text{C}$ , tabel 7.9, situație ce poate fi pusă pe seama presiunii de extrudare relativ reduse pe care o poate asigura standul și pe seama numeroaselor concatenări ale macromoleculi de PE care frânează mobilizarea segmentelor de lanț macromolecular prin contactele suplimentare ce le crează cu macromoleculele vecine.



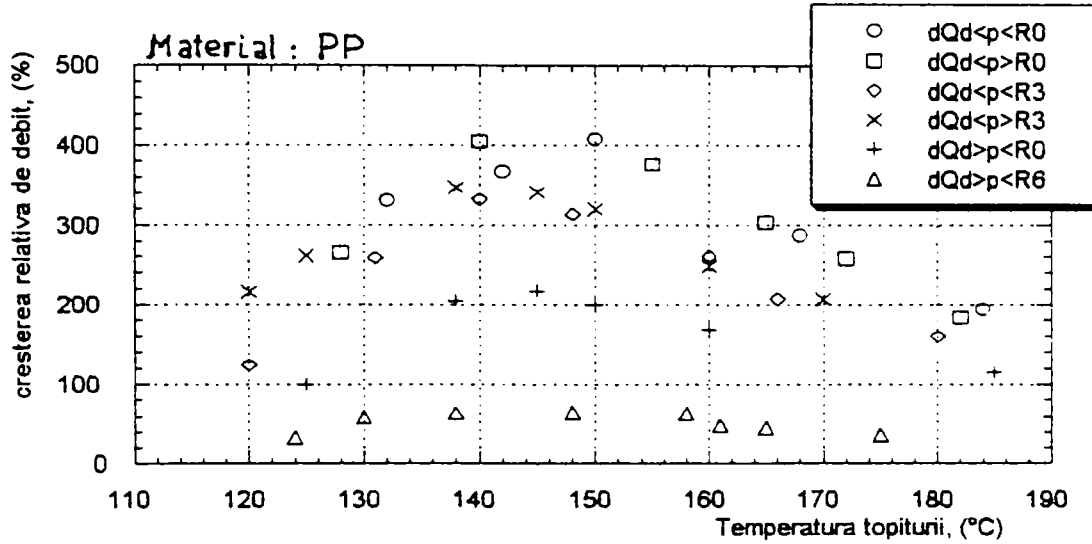
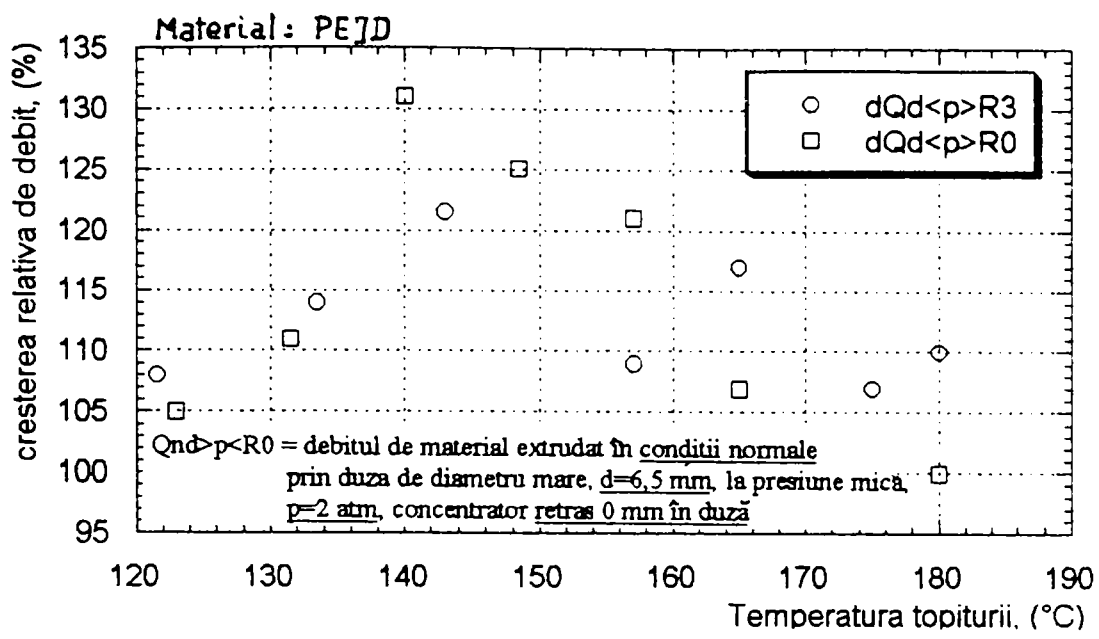
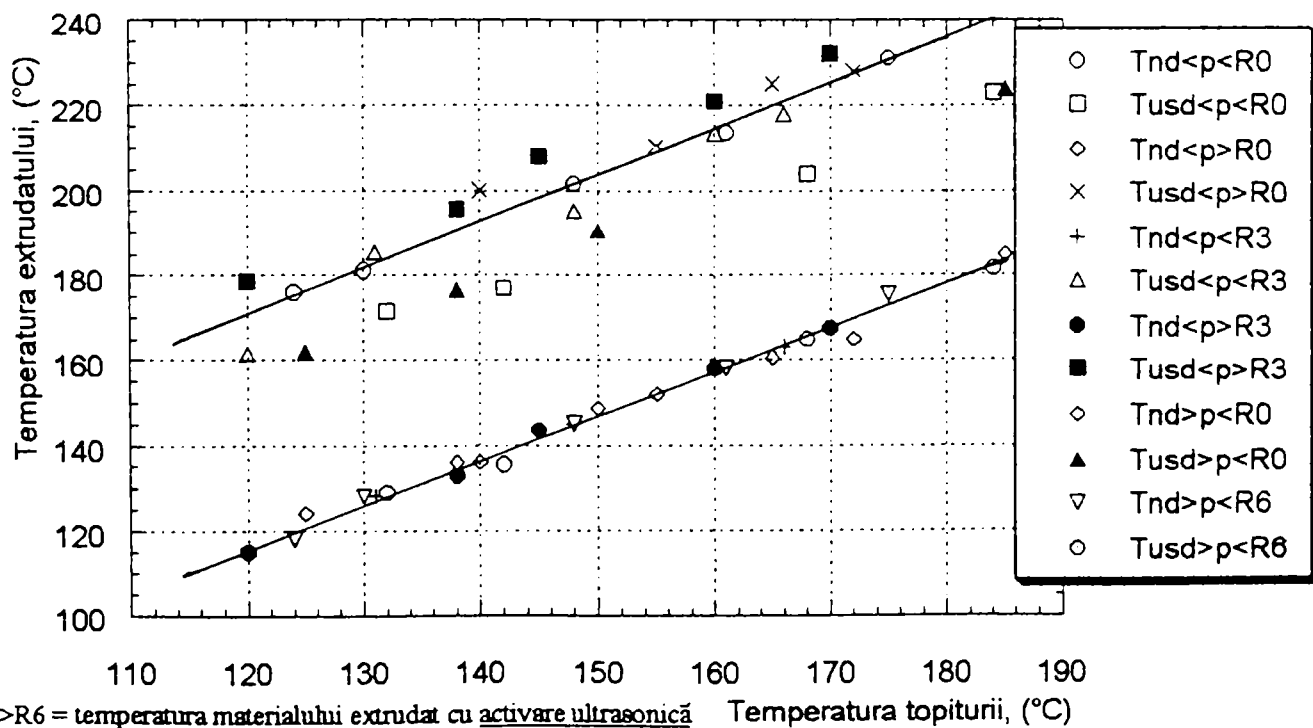


Figura 7.11 Creșterea relativă de debit ca urmare a activării ultrasonice



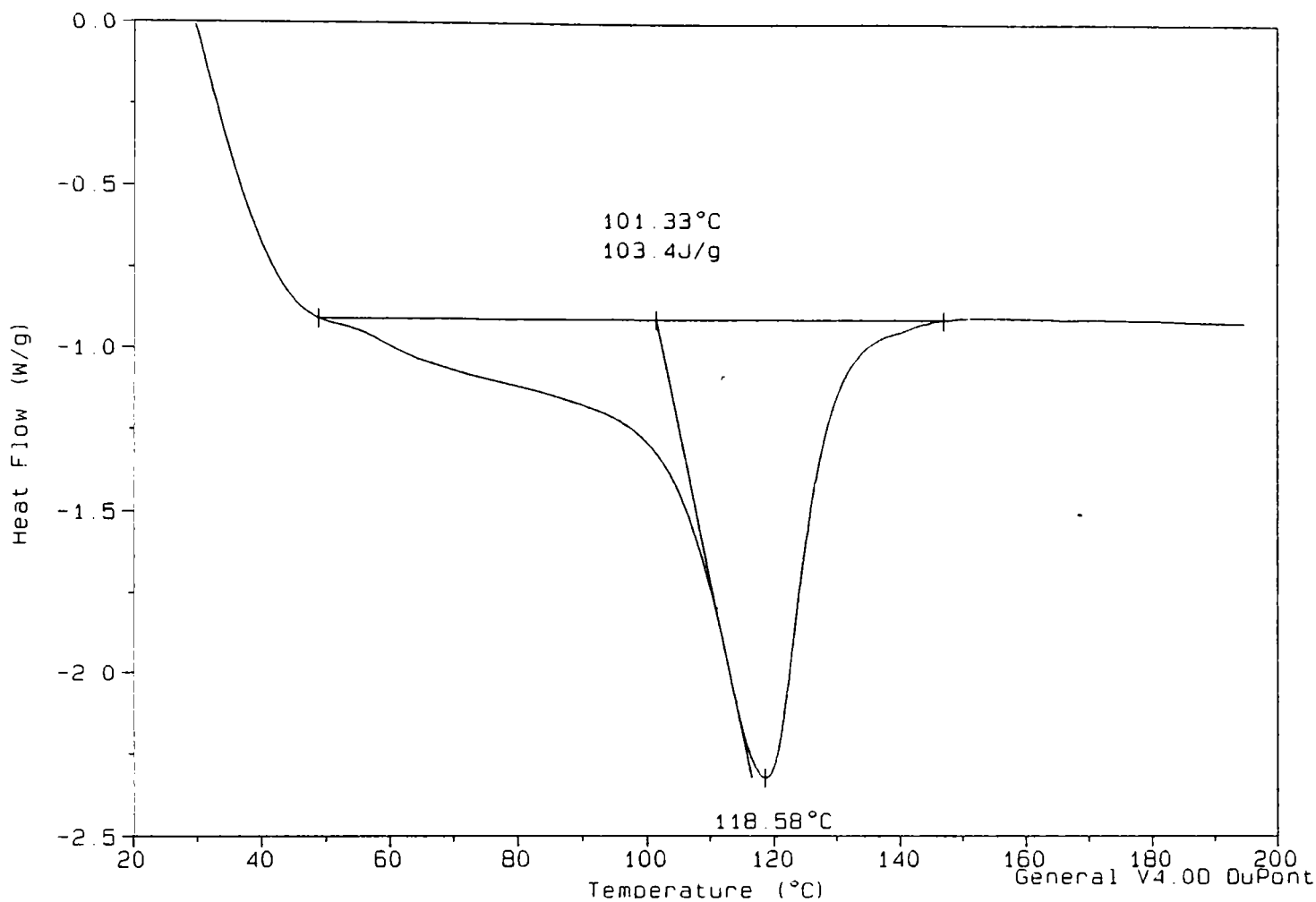
$T_{usd}<p>R6$  = temperatura materialului extrudat cu activare ultrasonică  
 prin duza de diametru mic,  $d=3,5$  mm, la presiune mare,  
 $p=5$  atm, concentrator retras 6 mm în duză

Figura 7.10 Temperatura polipropilenei extrudate în diferite condiții de lucru

Sample: pebd-cebron  
Size: 13.6360 mg  
Method: peth11  
Comment: ramp 20 C/min to 200 C

DSC

File: A:DAN.116  
Operator: lemp\mao dan  
Run Date: 19-Jul-97 11:56



Sample: pp-cj diffusion  
Size: 11.2340 mg  
Method: kh.mth  
Comment: ramp 10C/min to 200C

DSC

File: A:DAN.201  
Operator: lemp\mao dan  
Run Date: 27-Jun-97 11:32

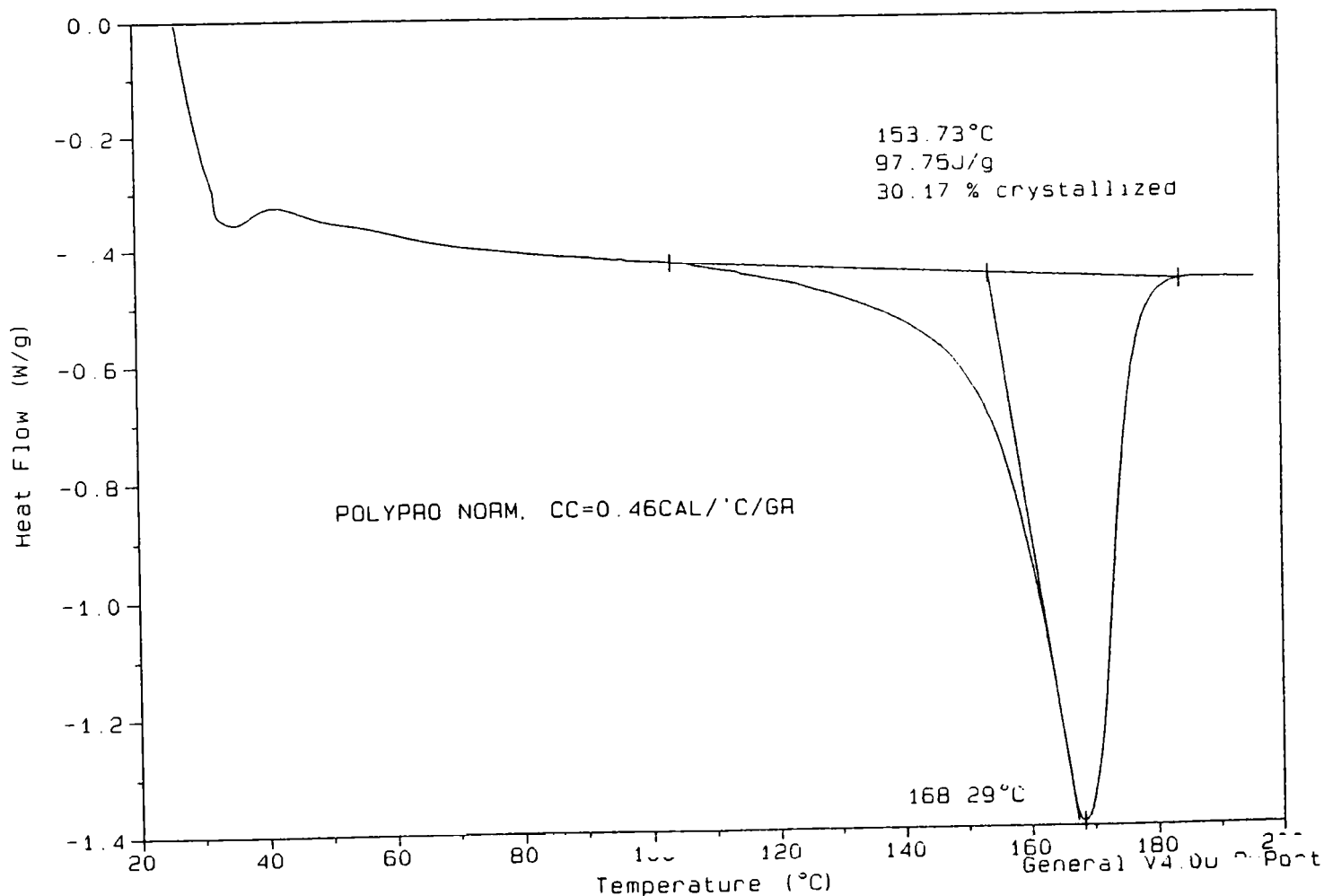


Figura 7.12 Curbe DSC pentru polietilena si polipropilena

### 7.2.5. Influența interstițiului de curgere asupra intensității efectului activării ultrasonice.

Reprezentarea grafică a creșterilor relative de debit pentru polipropilena, tabelul 7.9, funcție de temperatura topirii și interstițiul de curgere, figura 7.11, scoate în evidență efectul interstițiului de curgere în cazul activării ultrasonice a topirii tranzitate prin duza de extrudare.

Luând în considerare maximele (peak) curbelor de creștere relativă de debit, se constată că, pentru ambele materiale supuse studiului și interstiții de curgere mai mari de 1mm, aceste valori scad pe măsura ce valoarea interstițiului de curgere crește, situație care, din punct de vedere fenomenologic se poate explica prin ponderea tot mai mică pe care secțiunea "pielii", figura 1.34 (1.30), o are în suprafața liberă de curgere. De asemenea se poate constata existența unei pante descendente a grafului pentru interstiții de curgere mai mici de 1 mm. Pentru a explica acest comportament propunem distribuția de viteză a topirii din figura 7.13.

În vecinătatea suprafeței concentratorului curgerea se face fie cu alunecare la perete indusă de efectul de suprafață al activării ultrasonice, figura 7.13b, fie cu viteza mult sporită într-un strat subțire de grosime "e" ca urmare a manifestării efectului termo-pelicular, figura 7.13a.

Pentru ca maximele curbelor mai sus menționate sunt pentru valori de interstițiu de aproximativ 1mm, ținând seama și de distribuția parabolică a vitezei de curgere în zona neafectată de activarea ultrasonică, considerăm că grosimea stratului afectat de efectul termo-pelicular, "e", are o valoare apropiată celei a interstițiului critic de 1mm, valoarea probabila fiind  $e = 0,8...1 \text{ mm}$ .

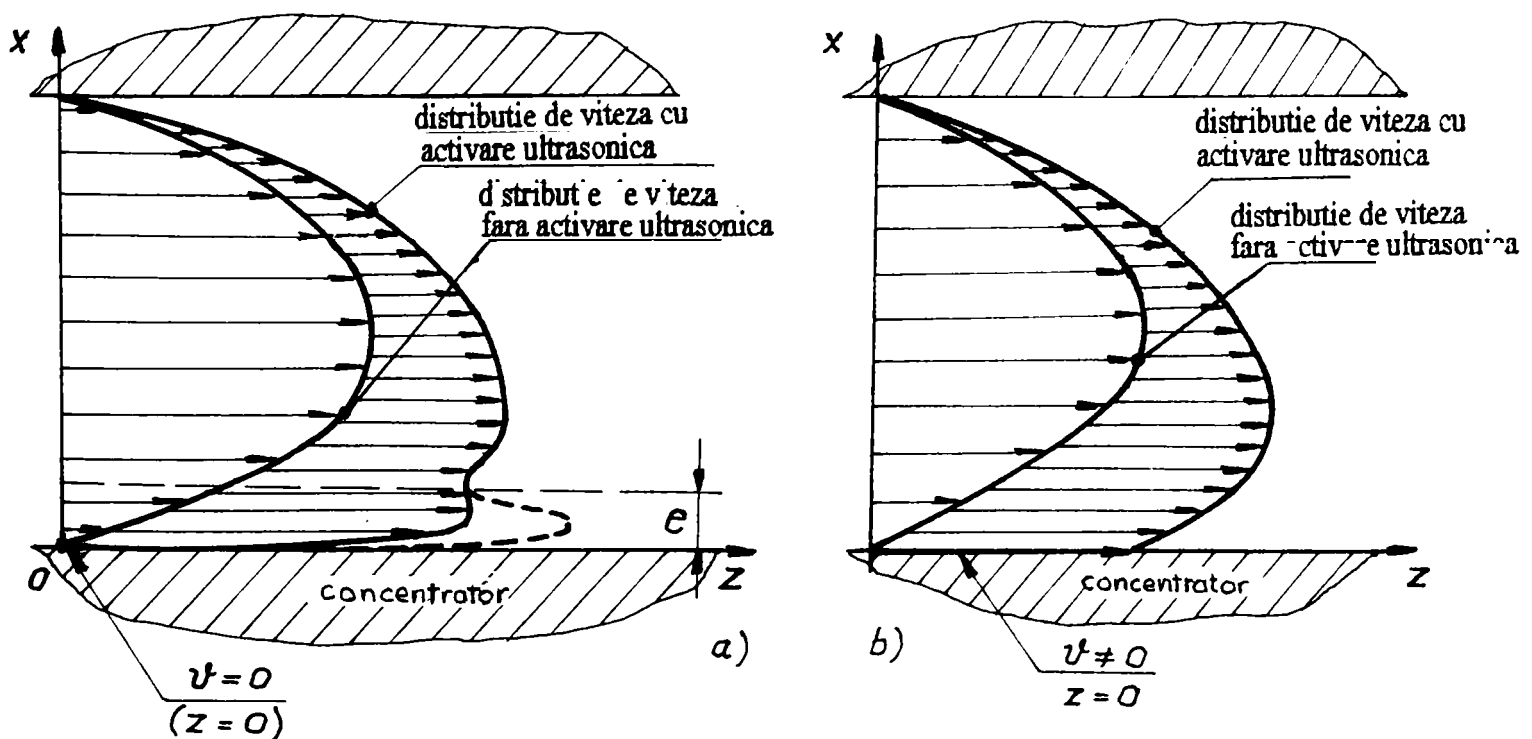


Figura 7.13 Distribuție ipotetică de viteză de curgere în vecinătatea suprafeței concentratorului

Deoarece ca variabilă-răspuns s-a utilizat creșterea relativă de debit, relația (7.1), și nu debitul extrudat, se poate considera că rezultatele nu sunt afectate de influența secțiunii de curgere și își păstrează valabilitatea oricare ar fi valoarea secțiunii libere de curgere.

### 7.2.6. Influența presiunii asupra intensității efectului activării ultrasonice

Reprezentarea grafică a debitului de polipropilenă extrudată prin interstițiu de 1 mm, tabelul 7.9, pune în evidență evoluția cvasi-paralela a debitului extrudat cu ultrasonare în raport cu debitul normal extrudat, atât pentru presiunea de 2 atm cât și pentru 5 atm, figura 7.14. Aceasta situație confirmă ipoteza distribuției de viteză prezentată în figura 7.13 și a grosimii stratului afectat de efectul termo-pelicular  $e = 0,8...1$  mm și faptul că pentru interstiții înguste de extrudare rolul presiunii în majorarea debitului în urma activării ultrasonice este minor.

Pentru interstiții de curgere mai mari de 1 mm efectul presiunii se face simțit pe măsura ce valoarea interstițiului crește, figura 7.15, dreptele ce reprezintă evoluția debitelor extrudate nu mai sunt paralele, ceea ce poate fi urmare a faptului că stratul afectat de efectul termo-pelicular nu acopera lărgimea interstițiului și există secțiuni de curgere neafectate în care se manifestă, în mod normal, influența presiunii asupra debitului ca și în condiții normale de extrudare.

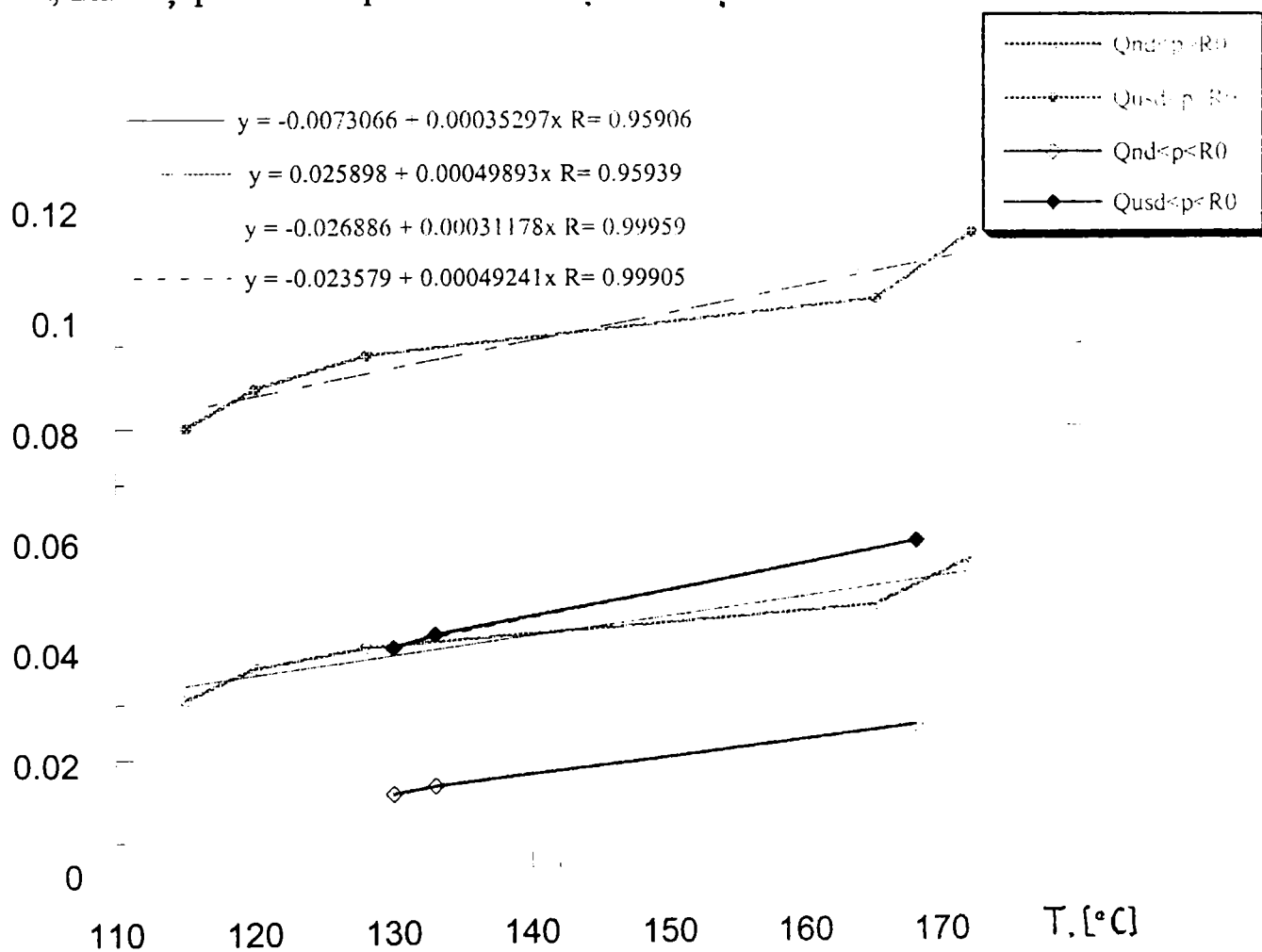


Figura 7.14 Efectul presiunii asupra debitului de polipropilena extrudat prin interstițiu de 1 mm

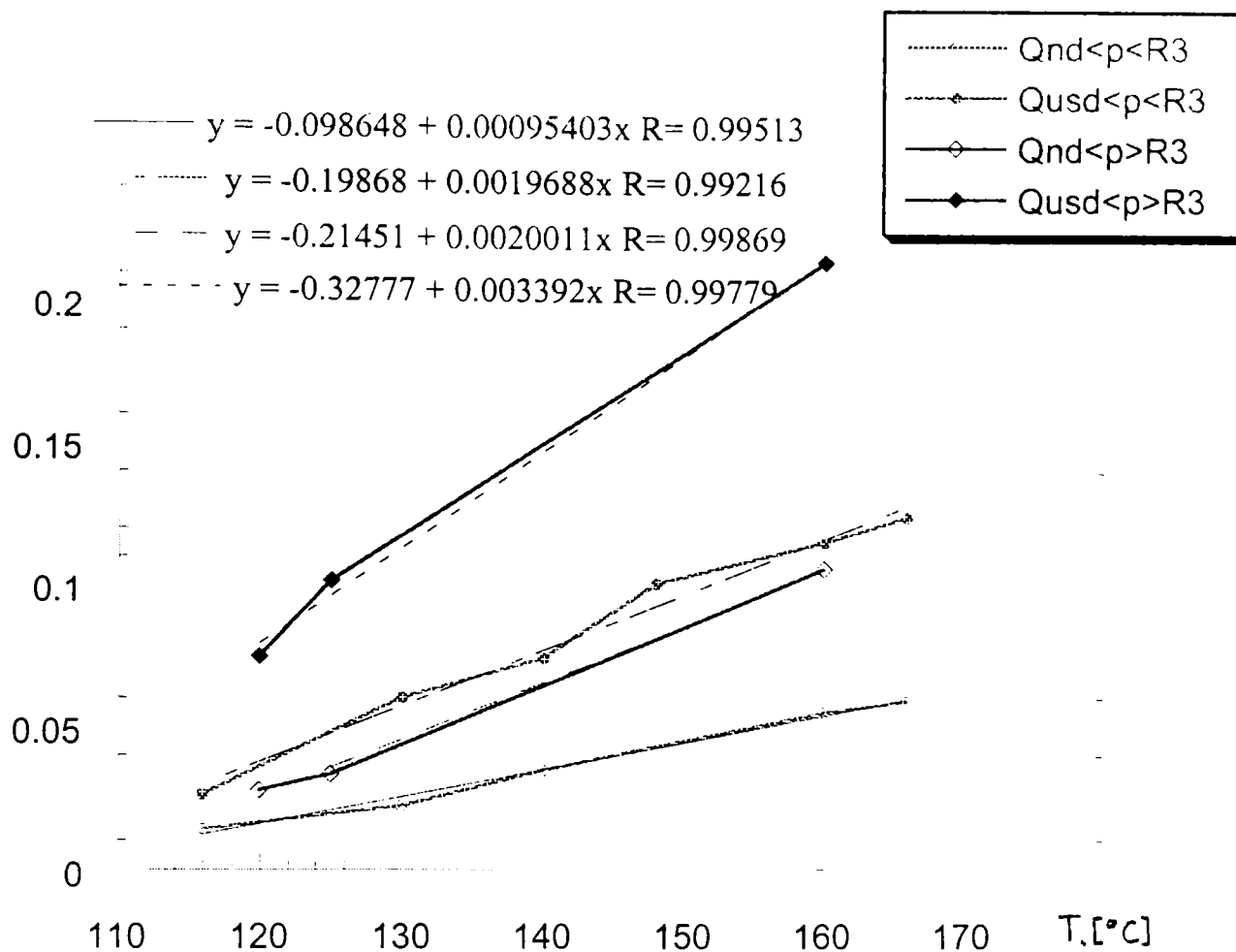


Figura 7.15 Efectul presiunii asupra debitului de polipropilenă extrudat prin interstițiu de 1,5 mm

### 7.2.7. Efectul activării ultrasonice asupra structurii supramoleculare a extrudatului.

Măsurarea variațiilor de energie termică ce însoțesc tranzițiile de stare a materialelor polimerice, tabel 1.1, poate pune în evidență proprietățile termodinamice ale acestora și, în egala măsură, poate oferi informații privind structura internă, gradul de puritate, stabilitatea oxidativă, etc.

Aplicațiile acestei tehnici de investigare sunt multiple: identificarea naturii unui polimer (prin determinarea temperaturii de tranziție, a caracteristicilor fizice și termodinamice fundamentale asociate tranziției), verificarea calității materialului, urmărirea cineticii unei reacții.

O seama de proprietăți fizice ale polimerilor dintre care: modulul specific, permeabilitatea, densitate, punct de topire, comportare la solicitare mecanică de scurtă durată (instantanee) sau de lungă durată (fluaj) sunt determinate de structura supramoleculară, respectiv de gradul de cristalinitate.

Utilizând o linie de analiză DSC (Differential Scanning Calorimeter) Du Pont s-a determinat căldura absorbită (transformare endoterma),  $\Delta H$ , pentru trecerea în stare topită și temperatura de topire (fuziune) pentru materialele polimerice supuse analizei.

Cunoscând căldura necesară fuziunii materialului 100% cristalin,  $\Delta H_{100\%}$ , Van Krevelen [123], se poate determina gradul (procentul) de cristalinitate, %crist., folosind relația:

$$\%crist. = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100\%}} \cdot 100, \text{ (Blaine [24])}$$

în care

$$\Delta H = \frac{A \cdot E \cdot B \cdot S \cdot 60}{m},$$

A = aria curbei endoterme de variație a energiei termice (temperaturii), [ $\text{in}^2$ ], în incinta izolată termic, figura 7.16, în condițiile unui aport termic constant ("ramp") de  $1 \div 10^\circ \text{ C/min}$ , prestabilit;

B = baza de timp a aparatului, [min/in];

E = coeficient de calibrare a celulei de analiză, [-];

S = sensibilitatea aparatului, [mcal/s-in];

m = masa probei, [mg].

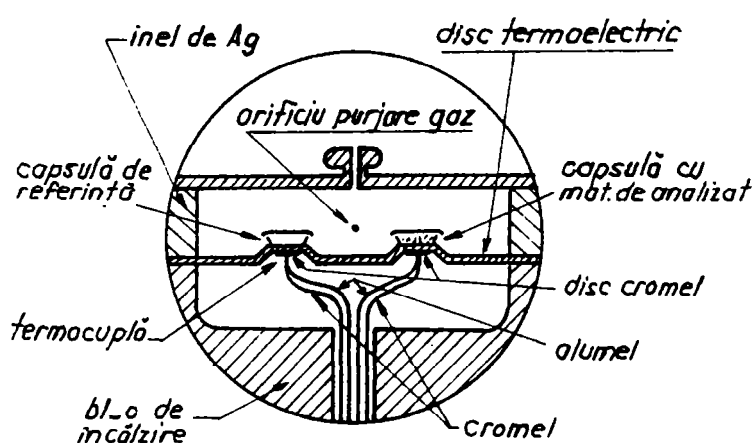


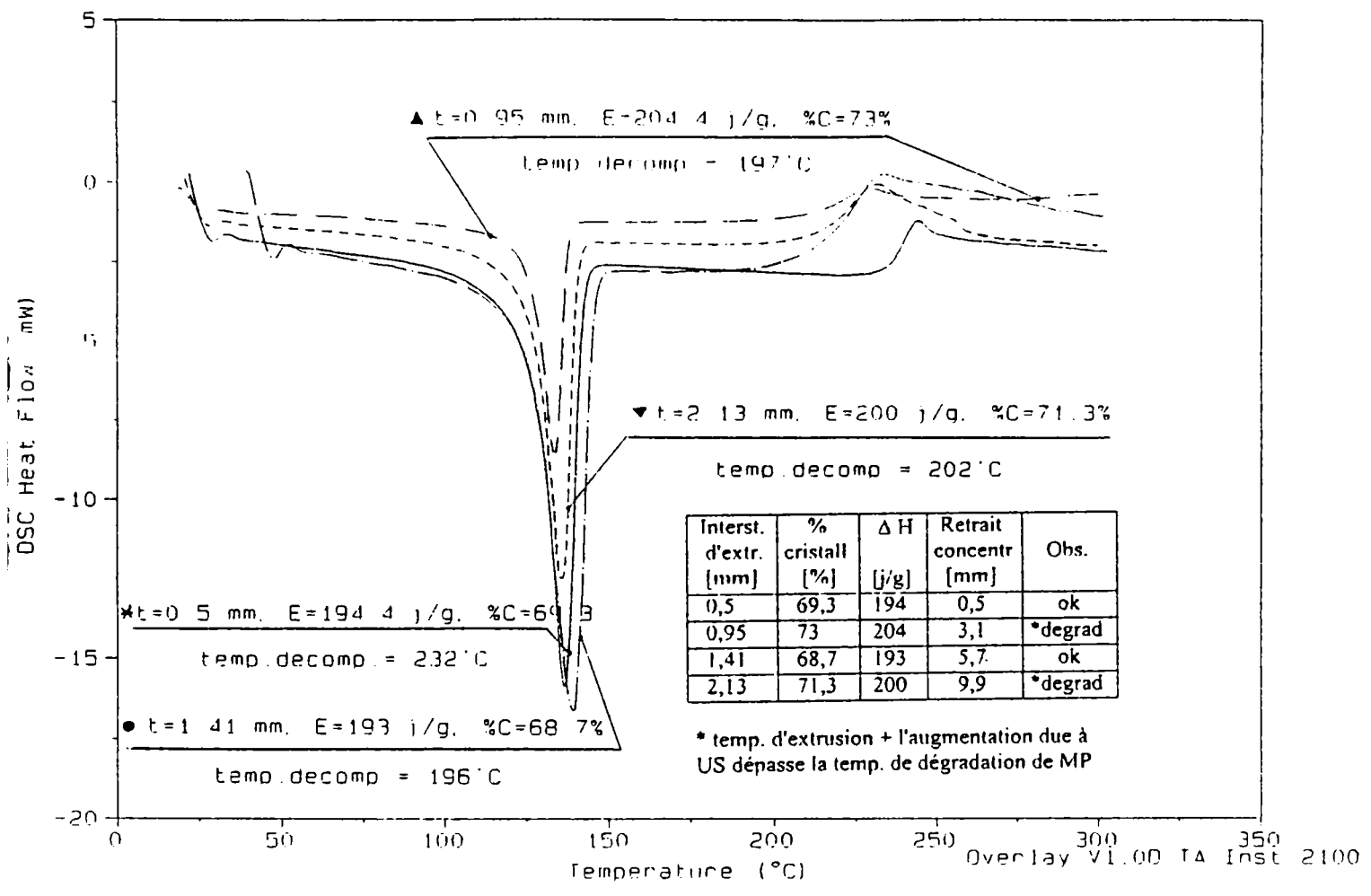
Figura 7.16 Celula DSC

Valorile de temperatura de fuziune și limitele de transformare endotermă stabilit prin analiză DSC, figura 7.12, au servit atât pentru verificarea rezultatelor prin comparare cu valorile  $T_f$  standard ale materialelor analizate cât și ca baza de orientare pentru proiectarea programului experimental.

Gradul de cristalinitate pentru materia primă utilizată și pentru produsele extrudării au fost, de asemenea, determinate prin analize DSC.

Analiza evoluției gradului de cristalinitate a produsului extrudării în comparație cu cel al materiei prime pentru polietilena extrudată la diferite valori de temperatura interstiiu de curgere este prezentată în figura 7.17a și b. Se remarcă creșterea gradului de cristalinitate cu până la 10%

\*DAN 303 (t=0.5), ▲DAN 226 (t=1.0), ●DAN 223 (t=1.4), ▼DAN 220 (t=2.13)



Experim. B

ETUDE COMPARATIVE: matiere vierge - prod extrudes sans ultrasons et ultrasonne

REF: DAN 003-mat vierge, DAN 287-extr sans US, DAN 285-extr +US

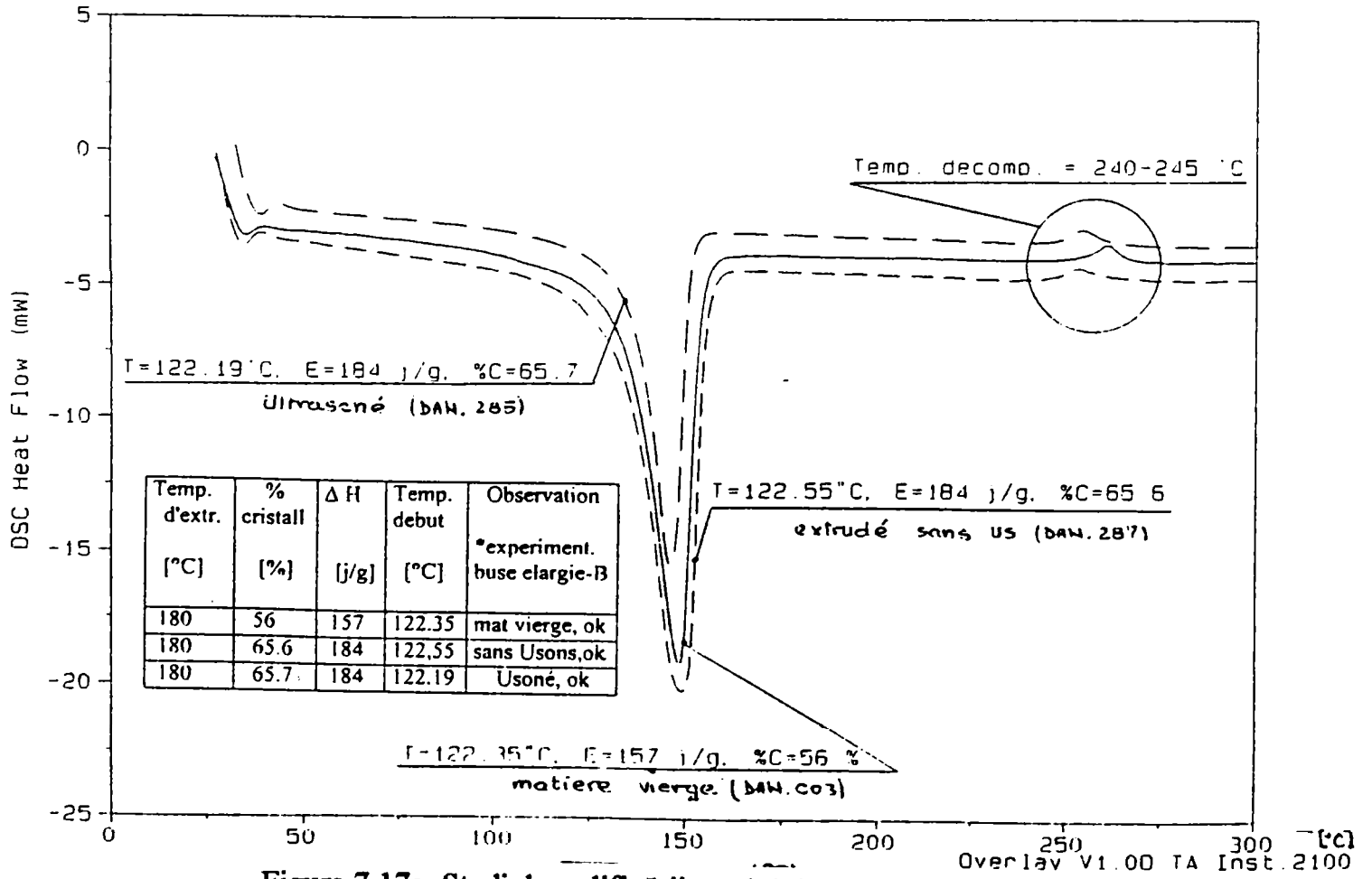
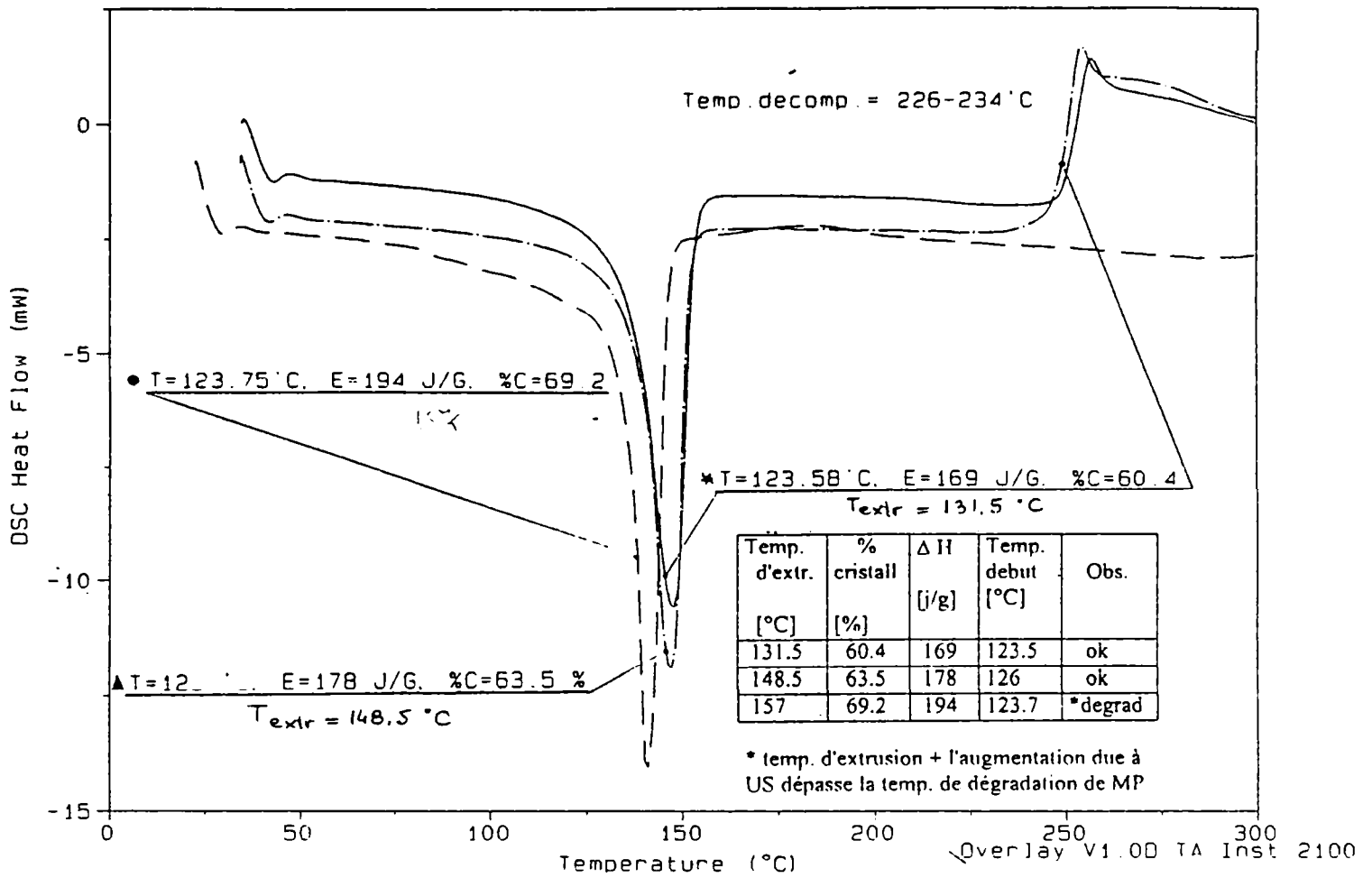


Figura 7.17a Studiul modificării gradului de cristalinitate pentru polietilenă, extrudată prin interstițiu de curgere de diferite valori

REF: \* DAN.298=>T=131.5°C. ▲ DAN.295=>T=148.5°C. ● DAN.293=>T=157°C

(injection)



**Experim. A**

ETUDE COMPARATIVE: matiere vierge - extrude a t=0.95 mm. ultrasoné

(injection)

REF: \* DAN 003 = matiere vierge. \*\* DAN.227 = extrude ultrasoné (effet maximum)

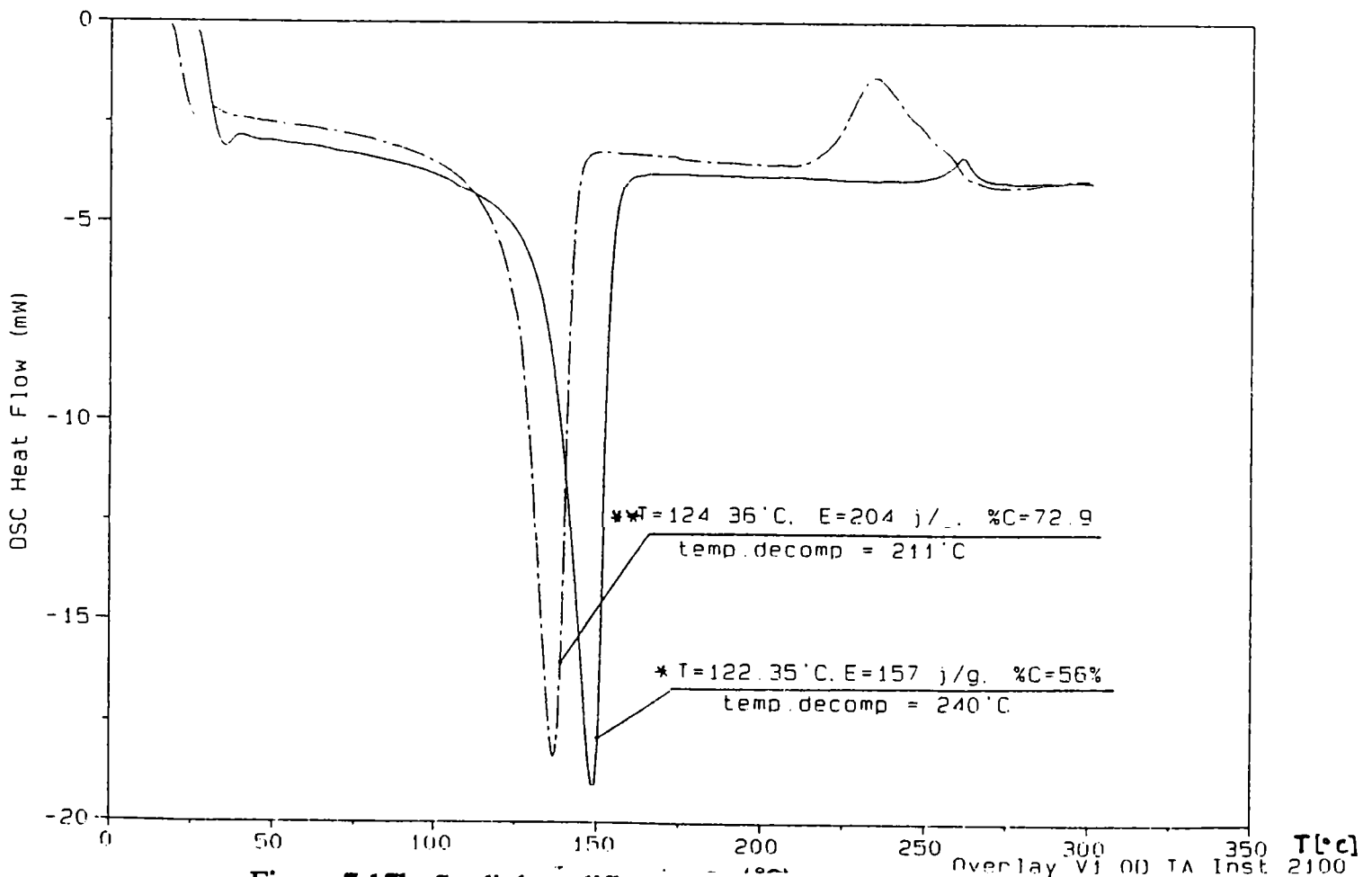


Figura 7.17b Studiul modificării gradului de cristalinitate pentru polietilena, pentru diferite temperaturi de extrudare



Diametru = 3.5 mm \* presiune = 2 si 5 att \* retras = 0 si 3 mm in duza \* US0/US1  
 Files: (\*) DAN.3 (\*\*\*) DAN.17 (\*\*\*) DAN.19 (\*\*\*) DAN.19

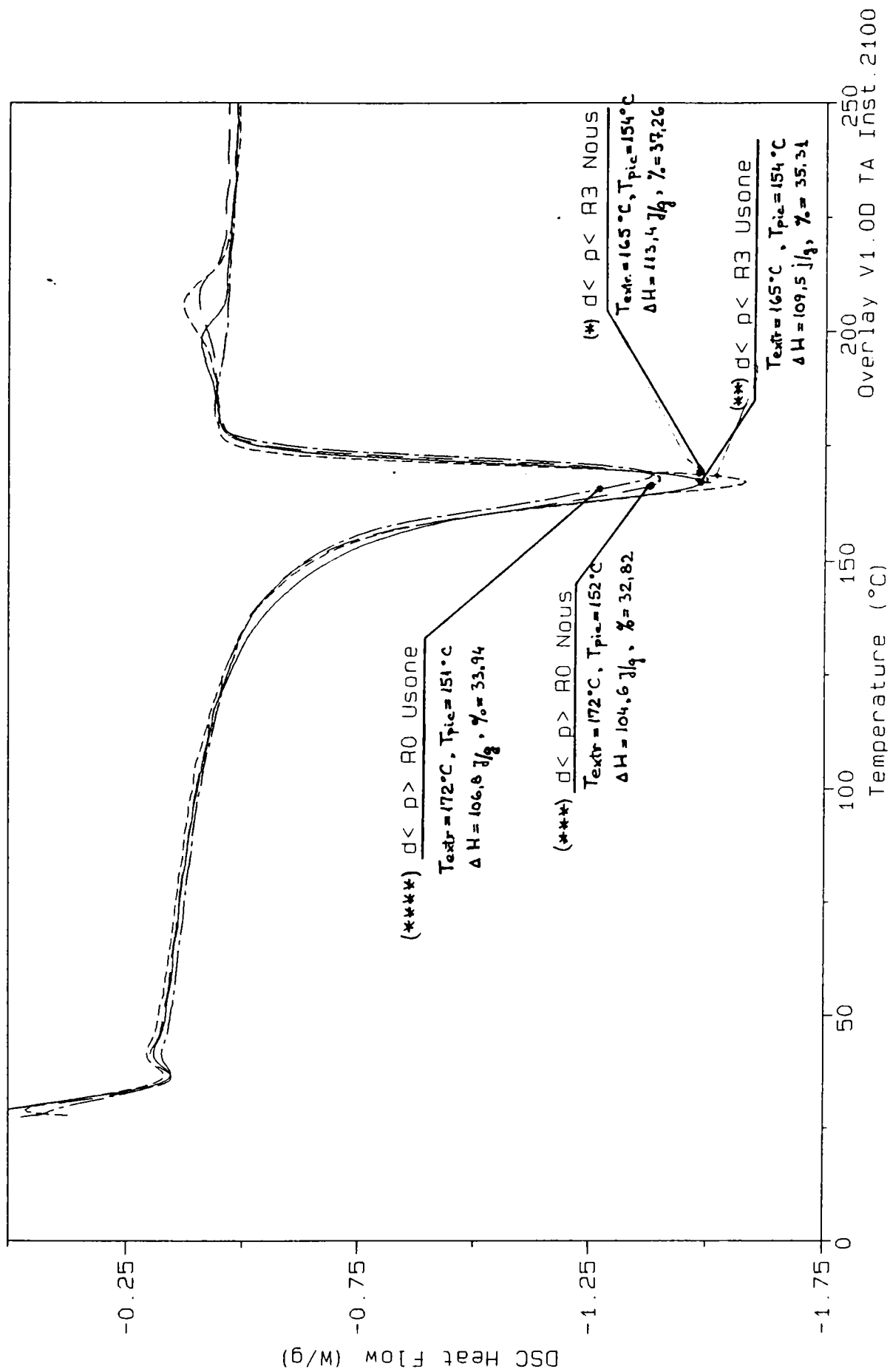


Figura 7.18 Studiul modificării gradului de cristalinitate pentru polipropilena

pentru materialul extrudat cu activare ultrasonică și creșterea entalpiei odată cu creșterea temperaturii topiturii sau ca urmare a activării ultrasonice.

Degradarea materialului care apare pentru valori mari de temperatură a topiturii poate fi pusă pe seama supraîncălzirii materialului ca urmare a activării ultrasonice și depășirii temperaturii maxime de utilizare.

Pentru polipropilena, figura 7.18, se constată menținerea relativ constantă a gradului de cristalinitate, activarea ultrasonică neavând nici o influență asupra acestei proprietăți fizice a materialului.

Diferențele de comportament între polietilena și polipropilena pot fi explicate prin configurația macromoleculară, cu ramificații, în cazul polietilenei. Activarea ultrasonică, prin energia suplimentară introdusă în sistem, ajută macromoleculele să iasă din pelota statistică. În plus, activarea vibratorie de înaltă frecvență poate determina ruperea concatenărilor macromoleculei favorizând eliberarea acesteia iar urmare a curgerii laminare, volumul macromolecular va fi supus unui proces de ordonare prin orientarea macromoleculelor în direcția curgerii ceea ce explică creșterea cristalinității în cazul polietilenei.

## Concluzii generale

1. În reologia lichidelor newtoniene este acceptată, ca și condiție limită, simplificatoare, viteza nulă la peretele canalului de curgere deci, teoretic, materialul plastifiat nu alunecă pe suprafața cu care ia contact. Pentru materialele polimerice, care manifestă un comportament vâscoelastic, compresibile, viteza la interfața polimer-solid poate fi nenulă prin apariția fenomenului de alunecare. Acest efect, pus în evidență teoretic (Giorgiou și Crocket [54]), este verificat experimental (Hatzkiriakos [60], Ramamurthy [99], El Kissi și Piau [47], Durand [43]), poate fi cauza amorsării regimului instabil de curgere și apariției defectelor de extrudare (Agassant [3]).

În procesul de injectare, materialul plastifiat sub presiune, transferat prin secțiunea de curgere prezintă un minim de temperatura în vecinătatea orificiului de intrare în cuib (punct de injectare) sau de ieșire din filiera de extrudare. Pentru ca temperatura materialului în acest punct să fie mai mare decât temperatura minimă de injectare/extrudare a materialului dar pe traseul de injectare să nu se depășească  $T_{\max.inj}$  se impune încălzirea localizată a materialului procesat doar în vecinătatea acestui punct final al traseului, efect ce poate fi obținut prin activarea ultrasonica.

La extrudare, pentru viteze mari de curgere, se instalează un regim de curgere nelaminar, turbulent, generator de defecte ale produsului extrudării fapt ce constituie o limitare a parametrilor de regim de procesare. Proprietățile suprafeței peretelui canalului de curgere și interacțiunea acesteia cu polimerul plastifiat au fost identificate drept cauze principale ale acestei manifestări și factori de influență asupra amorsării sau întârzierii curgerii turbulente ce generează defecte.

2. Capacitatea de a îmbunătăți bilanțul termic în zona critică a dispozitivului de procesare și de a modifica comportamentul reologic al topiturii prin influențarea interacțiunii polimer-perete de curgere recomandă activarea ultrasonica drept un mijloc de ameliorare și/sau control al proprietăților de curgere și a productivității pentru procedeele de punere în formă.

Față de alte măsuri luate în același scop:

- alegerea materialului filierei a.î. să aibă o structură cristalină cât mai fină, izotropă și compactă;
- lustruirea suprafețelor active ale filierei;
- acoperirea acestor suprafețe cu un material florurat cu energie de suprafață mică;
- aditivarea topiturii cu polimer florurat care se depune pe peretele de curgere

activarea ultrasonică a procedeelor de punere în formă prezintă avantajul flexibilității prin posibilitatea de gradare a manifestării efectelor asociate prin controlul intensității de activare.

3. Soluția constructivă pentru activarea ultrasonică a procesului de injectare sau extrudare a materialului polimeric poate fi dată de duza finală sau cap de extrudare, figurile 2.2, 2.6, 2.8 a căror element central se constituie în concentratorul unui ansamblu ultrasonic, figurile 4.1 și 4.2, rezultatul fiind de concentrare a efectelor specifice într-o zonă restrânsă - punctul de injectare sau ieșirea din filiera de extrudare.

În procesul de injectare, este posibilă astfel reducerea sensibilă a consumului energetic pentru cartușele încălzitoare din blocul cald - nu este necesară supraîncălzirea materialului pentru a-i asigura fluiditatea, figura 2.5- sau se pot elimina cartușele încălzitoare din duzele finale, scurte, de injecție. Puterea instalată se reduce, în medie, cu cel puțin 500 W pentru fiecare cuib al matriței.

La extrudare se poate reduce semnificativ rezistența prin frecare pe care elementele componente ale capului de extrudare o opun înaintării materialului polimeric procesat, rezultatul fiind calitatea superioară a suprafeței profilului rezultat chiar pentru valori mari ale vitezei de extrudare, situație în care, la extrudarea în condiții normale, s-ar declanșa curgerea turbulentă. Reducerea coeficientului aparent de frecare a materialului plastifiat cu peretele duzei de ieșire ca urmare a activării ultrasonice poate duce la creșterea valorii indicelui topiturii  $IT_{rel}$  fără a fi operată o modificare de temperatură a topiturii. Acest efect a fost folosit pentru evidențierea avantajelor unei activări ultrasonice în cazul procedeelor de procesare a materialelor polimerice.

4. Activarea ultrasonică aplicată topiturii de material polimeric tranzitat prin dispozitivele de procesare îmbunătățește proprietățile reologice ale acestuia modificând dinamica macromoleculară, timpul de relaxare a moleculelor din vecinătatea peretelui și favorizând orientarea macromoleculelor în direcția curgerii.

Ca efecte colaterale, pentru polietilena, se constată creșterea procentului de cristalinitate, poziția frontalului concentratorului în raport cu secțiunea de ieșire din duza având rol determinant în acest sens, curbele DSC din figura 7.16. Reducerea lungimii lanțurilor macromoleculare sau ruperea concatenărilor macromoleculei ca urmare a solicitării mecanice induse de activarea ultrasonica pot constitui cauze ipotetice ale acestui fenomen.

5. Efectele cumulate, termic și de reducere a frecării, se manifestă pentru valori mici de interstii de curgere (aprox.  $t = 1$  mm) determinând majorarea de temperatură în aval față de frontalul concentratorului (cu până la  $80^{\circ}\text{C}$ , pentru PEJD – a se vedea tabelul 7.6) și majorarea debitului extrudat (spor de debit de 150...400%, în funcție de materialul procesat).

Sporul de debit, ca urmare a activării ultrasonice, este mult superior rezultatelor extrudării aceluiași material prin filiera de cristal pe a cărei suprafață de curgere a fost grefat, în strat fin, triclorosilan florurat pentru reducerea energiei de suprafață (El Kissi [47])

6. Comportarea reologica a topiturii de polimer prin secțiunea transversală a filierei de extrudare este influențată de mai mulți parametri dintre care un rol hotărâtor îl au rugozitatea și energia de suprafață a topiturii, deci interacțiunile susceptibile a se dezvolta la interfața polimer topit-peretele secțiunii de curgere.

După cum s-a arătat în capitolul 1, numeroase programe de studiu experimental precum cele ale cercetătorilor El Kissi, Ramamurthy, De Smet și Nam au fost orientate în scopul identificării efectelor induse de modificarea proprietăților interfeței de contact fluid-perete asupra comportării reologice ale topiturilor de polimer.

Același scop definește programul de cercetare pe care l-am abordat, dar modificările de comportament reologic în condițiile modificării interacțiunii fluid-perete, la nivelul interfeței de contact, au fost provocate într-un mod mai puțin convențional, utilizând efectele susceptibile a se manifesta în cazul activării ultrasonice a peretelui:

E1: efectul de suprafață – pus în evidență pe suprafața laterală a concentratorului în contact cu fluidul sub presiune. Consta în reducerea frecării la nivelul acestei suprafețe laterale,  $S_L$ , figura 7.6, și determină creșterea vitezei aparente de curgere la perete, a vitezei medii de curgere și a debitului;

E2: efectul termo-acustic.

Activarea ultrasonică, prin efectul termo-acustic indus la nivelul suprafeței laterale de contact cu fluidul, provoacă formarea unui strat fin de material supraîncălzit, de vâscozitate

mult redusă în raport cu vâscozitatea volumului topiturii, cu proprietăți lubrifiante care favorizează transferul de material prin secțiunea de curgere.

Efectul de suprafață ce se manifestă la nivelul aceleiași suprafețe a concentratorului, atât în cazul experimentărilor de tip A cât și a celor de tip B favorizează desprinderea topiturii de perete astfel încât majorarea de debit este accentuată fără a induce apariția variațiilor oscilatorii de debit la ieșirea din filieră (defecte de extrudare).

Aceste două efecte manifestate în cazul activării ultrasonice a fluidelor vâscoase sub presiune în situația în care concentratorul este "imersat" în fluidul activat, se suprapun și sunt inseparabile la nivelul suprafeței laterale a concentratorului motiv pentru care considerăm oportună desemnarea acestei sinergii, cu efect direct asupra proprietăților reologice aparente ale fluidului, sub numele de "*efect ultrasonic termo-pelicular*".

7. Având certitudinea efectului benefic al activării ultrasonice în cazul activării suprafeței interioare a canalului inelar de curgere, este de așteptat ca o dublă activare, a suprafeței interioare și a celei exterioare, să multiplice efectul pozitiv demonstrat experimental.

În baza acestui considerent s-a întocmit documentația pentru brevetarea soluțiilor constructive prezentate în capitolul 4 (cereri de brevet de invenție dosar OSIM C/1305/15.10.1997 *Procedeu și cap de extrudare cu activare ultrasonică* și dosar OSIM C/25/09.01.1997 *Matrită de injecție activată cu ultrasunete*, ANEXA 4).

8. Rezultatele cercetărilor pe care le-am efectuat vin în sprijinul propunerilor cercetătorilor Fairbanks și Shin-Ichi Matsuoka, de utilizare a activării ultrasonice la procesarea prin presare a pulberilor de polimer și extind aplicabilitatea activării cu vibrații de înaltă frecvență într-un domeniu mult mai larg: injectarea și extrudarea materialelor termoplaste. Deoarece în experimentările realizate am folosit un sistem ultrasonic de putere redusă (maxim 100 W putere utilă) este de așteptat, ca la puteri de activare mai mari, să se manifeste o creștere de debit importantă ca efect a reducerii de vâscozitate aparentă, consecință a efectelor cumulate de suprafață și de transformare a energiei ultrasonice în energie termică.

Faptul că pentru PEJD extrudată prin interstițiu de gabarit mic, efectul termic asociat activării produce degradarea materialului extrudat ne îndreptățește a considera că majorarea puterii de activare nu este benefică. O excepție o poate constitui cazul necesității de activare a unei filiere de extrudare cu dimensiuni mari de gabarit, situație în care se impune asigurarea unei densități energetice suficient de mari pentru obținerea unor efecte pozitive.

9. Mai multe tipuri de material polimeric dintre care : polietilena de joasa și de înaltă densitate (PEJD, PEID), polipropilena (PP), ABS, policarbonați (PC) și polisulfone (PSU) au constituit obiectul unui studiu preliminar în să comportarea lor în timpul încercărilor de extrudare a fost diferita după cum urmează :

- PEJD, PEID și PP au fost extrudate, cu sau fără activare ultrasonică, în condițiile de variație a parametrilor de reglaj într-o gamă largă de valori. În ceea ce privește calitatea produsul extrudării s-a putut constata apariția defectelor de extrudare în condiții normale de manifestare a acestora : valori mari impuse pentru debitul de extrudare sau presiunea topiturii. A fost posibilă realizarea în bune condiții a unui studiu comparativ, între extrudarea cu și fără activare ultrasonică.
- în cazul PC nu s-a putut realiza extrudarea în limitele de variație a parametrilor de reglaj ai standului decât în prezența activării ultrasonice iar produsul extrudării prezintă defecte de suprafață accentuate specifice extrudării topiturii la temperatura prea scăzută ;
- nu s-a putut realiza extrudarea, în limitele de variație a parametrilor de reglaj ai standului, în cazul încercărilor realizate cu ABS și PSU.

Aceste insuccese care se datorează în principal scăderii inevitabile de temperatura în zona secțiunii de ieșire din duza de extrudare și reacției pe care materialele cu sensibilitate sporită privind temperatura de procesare au manifestat-o în această situație.

Utilitatea acestor încercări a constat în aceea că au pus în evidență, în cazul extrudării PC cu activare ultrasonică, faptul că o astfel de activare vibratorie de înaltă frecvență, în condiții la limită de curgere, poate ajuta (determina) depășirea unui anumit prag energetic și declanșarea curgerii.

## Contributii personale

Domeniul vizat prin titlul acestei teze este relativ nou și complex, cu caracter interdisciplinar - activarea ultrasonică a curgerii materialelor vâscoelastice -, aplicațiile imediate fiind preconizate a se implementa în cazul procedeelor de fabricație care presupun curgerea materialelor polimerice topite cum ar fi injectarea și extrudarea.

Cercetările teoretice și experimentale întreprinse în cadrul acestei teze de doctorat aduc o serie de contribuții, apreciate de autor ca fiind originale, la cunoașterea comportamentului reologic al topiturilor de polimeri în cazul activării ultrasonice a curgerii acestora, la îmbogățirea orizontului de cunoaștere în domeniul reologiei materialelor vâsco-elastice:

### *In domeniul cercetării fundamentale:*

- sinteza bibliografică privind dinamica și reologia topiturilor de polimeri;
- sinteza bibliografică privind principiile activării ultrasonice și echipamentele specifice utilizate în aplicații industriale;
- elaborarea unui model matematic pentru curgerea cu alunecare la perete și a unui algoritm de determinare a vitezei de alunecare la perete;

### *In domeniul cercetării aplicative:*

- definirea soluției constructive și realizare practică pentru un reometru în echer cu activare ultrasonică ce a fost folosit pentru realizarea părții experimentale a prezentei teze;
- cercetări experimentale privind stabilirea factorilor de influență asupra debitului volumic extrudat și a temperaturii extrudatului în cazul extrudării activate cu vibrații de înaltă frecvență. Pe baza unui program de cercetare bazat pe experiment factorial s-au investigat și cuantificat efectele activării ultrasonice asupra mediului vâscoelastic activat și influențele colaterale ale temperaturii, presiunii, interstițiului de curgere. Printre efectele induse de activarea ultrasonica puse în evidență se numără și efectul termopelicular pe care îl semnalăm ca o noutate în domeniul aplicațiilor ultraacustice;

### *In perspectiva aplicării industriale:*

- definirea unor soluții tehnice de activare ultrasonica a dispozitivelor de formare utilizate la injectarea și extrudarea materialelor polimerice. Acestea constituie obiectul a două cereri de brevet de invenție: dosar OSIM C/1305/15.10.1997 *Procedeu și cap de extrudare cu activare ultrasonică* și dosar OSIM C/25/09.01.1997 *Matrită de injecție activată cu ultrasunete*, ANEXA 4.



## Bibliografie

1. Achenbach J.D., Evaluations of Materials and structures by Quantitative Ultrasonics, Springer Verlag, New York, 1993 ;
2. Agassant J. F., Avenas P., Sergent J. Ph., La mise en forme des matières plastiques, ed Tech & Doc, Lavoisier, 1986 ;
3. Agassant J.F., Avenas P., Sergent J.P., Carreau P. - Polymer processing principles and modeling, edit. Hanser, Publisher, 1996 ;
4. Agassant J.F., Vergnes B., Vincent M, rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 68/1993, pg. 153, 3-rd AIM Conf. on Advanced Topics in Polym. Sci., june 1992, Gargano, Italy;
5. Aleman J.V., Theor. and Applied Rheol., Elsevier Sci. Publ./1992, pg. 80, XI-th Congr. on Rheol., 1992, Brussels, Belgium ;
6. Amza Gh., Sisteme ultraacustice, Editura Tehnica, Bucuresti, 1998 ;
7. Atwood B. T., Schowalter W. R., Rheol. Acta, n°33/1989, pg. 1359 ;
8. Byahiaoui B., Massan M., C.R. Acad. Sci. Paris, vol. 308/1989, pg.1771 ;
9. Badarau E., Grumazescu M., Realizari noi in ultraacustica, Editura Tehnica, Bucuresti, 1955 ;
10. Badarau E., Grumazescu M., Ultraacustica fizica si tehnica, Editura Tehnica, Bucuresti, 1967 ;
11. Bagley E. B., Appl. Phys., n°28/1957, pg. 624 ;
12. Bagley E. B., Cabott I. M., West D. C., J. of Appl. Phys. N°29/1958, pg. 109 ;
13. Bagley E. B., J. Appl. Phys., n° 31/1960, pg. 1126 ;
14. Bagley E.B., Schreiber H., Rheology, vol. 5, chap. 3, Acad. Press, New York, 1969 ;
15. Bainton K.F., Silk M.G., Some factors which affect the Performance of Ultrasonic Transducers, British Journal of N.D.T, jan. 1980 ;
16. Baker F.S., M. Thomas M., rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 68/1993, pg. 13, 3-rd AIM Conf. on Advanced Topics in Polym. Sci., june 1992, Gargano, Italy;
17. Bartos O., Holomek J., J. of Polim. Eng. Sci., n°11/1971, pg. 324 ;
18. Beaufils P., Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris, 1989 ;
19. Benallal A., Thèse de doctorat, l'Univ. de Pau et des Pays de l'Adour, 1991 ;
20. Benbow J. J., Lamb P., SPE Transactions, n°3/ 1963, pg. 7 ;

21. Bergem N., Proc VII<sup>th</sup> Int. Congress of Rheology, Gothenburg, 1976, pg. 50 ;
22. Beyer R.T., Letcher S.V., Physical Ultrasonics, Academic Press, New York, 1969 ;
23. Bingham E. C., Fluidity and Plasticity, ed. Mc Graw-Hill, New York, 1923 ;
24. Blaine R.L., Thermal Analysis, Du Pont Company Instrument Products – Appl. Brief ;
25. Booij H.C., Palmen J.H.M., rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 56/1992, pg. 99, 14-th Conf. of Prague Meetings On Macromolecules " Rheology of Polymer Melts", july 1991, Prague, Czechoslovakia ;
26. Bubsby E. T., Mac Sporrán J., J. Non-Newtonian Fluid Mech., n°1/1976, pg. 71 ;
27. Bueche F., J. Chem. Phys., no. 20/1952, pg. 1959 ;
28. Bueche F., J. Chem. Phys., no. 21/1953, pg. 1850;
29. Bueche F., J. Chem. Phys., no. 22/1954, pg. 1570 ;
30. Bueche F., J. Chem. Phys., no. 25/1956, pg. 599 ;
31. Bueche F., J. Chem. Phys., no. 40/1964, pg. 484 ;
32. Carter R.E., Baker F.S., Cahiers de Rhéol., Le Mans, 1993, vol.11, no.3-4, pg. 205 ;
33. Cloizeaux J., Cahiers de Rheol., Le Mans, 1993, vol.11, no. 3-4, pg.225 ;
34. Collyer A.A., Techniques in rheological measurements, Chapman&Hall, London, 1996 ;
35. De Gennes P.G., Prost J., Physics of liquid crystals, Oxford Clarendon Press, 1993;
36. De Gennes P.G., Scaling concepts in polymer physics, Cornell University Press 1979;
37. De Smet C., Nam S., Plastic & Rubber Processing & Applications, no.8/1987, p.11;
38. Debbaut B., Crochet M.J., J. non Newtonian Fluid Mechanics, no.30/1988, pg. 173;
39. Den Otter J. L., Plastics & Polymers, n°38/1970, pg. 155 ;
40. Den Otter J. L., Rheol. Acta, n°10/ 1971, pg. 200 ;
41. Doolittle A. K., J. Appl. Phys., n° 22/1951, pg. 1471 ;
42. Drăgan O., Iancu C., s.a., Ultrasunete de mari energii, Editura Academiei R.S.R, București, 1983 ;
43. Durand V., Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris, 1993 ;
44. Dym J.B. - Injection Molds and Molding - Practical Manual, Van Nostrand Reinhold Comp. , New York, 1987;
45. El Kissi N., Léger L., Piau J.M., Mezghani A., Cahiers de Rheol., Le Mans, 1993, vol.11, no. 3-4, pg. 357 ;
46. El Kissi N., Piau J. M., C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Série II, 7, (1989) ;
47. El Kissi N., Piau J. M., Proc. GDR 901, Rhéologie pour la transformation des polymères fondus, IMG Grenoble, 171, (1991) ;

48. El Kissi N., Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1989
49. Eyring H., Journal of Chem. Phys., n° 4/1936, pg. 283 ;
50. Fairbanks H.V., Ultrasonics, nr. 12(1) / 1974, pg. 22 ;
51. Feher L. - Muanyagfeldolgozas szerszamai , Kecskemet, 1986;
52. Ferry J. D., Viscoelastic properties of polymers, ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1970 ;
53. Gavrilăş I., Marinescu N.I., Prelucrări neconvenţionale în construcţia de maşini, vol. I, Editura Tehnică, Bucureşti, 1991 ;
54. Giorgiou G., Crocket M. J. , Journal of Rheology, 1994-05, vol.38, no. 3, p.639 ;
55. Graessley W. W., J. Chem. Phys., no. 43/1965, pg. 2696 ;
56. Graessley W. W., J. Chem. Phys., no. 47/1967, pg. 1942 ;
57. Grmela M., rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 56/1992, pg. 43, 14-th Conf. of Prague Meetings On Macromolecules " Rheology of Polymer Melts", july 1991, Prague, Czechoslovakia
58. Hatzikiriakos S. G., Dealy J. M., J. of Rheol., n°36/1992, pg. 703 ;
59. Hatzikiriakos S. G., Dealy J. M., J. of Rheol., n°36/1992, pg. 845 ;
60. Hatzikiriakos S. G., Intern. Polymer Proczzsing VIII, no. 2/1993, pg. 135 ;
61. Hatzikiriakos S., Dealy J. M., J.of Rheologie, no. 35 (4), 1991, p. 497;
62. Hatzikiriakos Sg., Kalogerakis N. , Rheologica acta, 1994, vol.33, no.1, p. 38 ;
63. Huynh H. T., Thèse de doctorat 3<sup>eme</sup> cycle, l'Univ. Pierre et Marie Curie, 1979 ;
64. Iclănzan T., teza de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1976 ;
65. Iclănzan T., - Plasturgie - procedee de prelucrare a materialelor plastice, vol. I, II, Litografia Univ.Politehnica Timișoara, 1995;
66. Iclănzan T., Les principes fonctionnels et constructifs des systemes technologiques aux ultrasons, Rapport d'étude, 1996 ;
67. Iclănzan T., Tehnologii și echipamente cu ultrasunete, Indrumător pentru lucrări de laborator, Univ. Politehnica, Timisoara, 1993 ;
68. Kim S.S., Han C.D., rev. Macromolecules, no. 26/1993, pg. 6633 ;
69. Kurtz S.J., Theor. and Applied Rheol., Elsevier Sci. Publ./1992, pg. 377, XI-th Congr. on Rheol., 1992, Brussels, Belgium ;
70. Kuttruff H., Ultrasonics-fundamentals and applications, Elsevier Appl.Sci.,Paris, 1991
71. Larson R. G., Rheol. Acta, n°31/ 1992, pg. 213 ;

72. Laun H.M., rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 56/1992, pg. 55, 14-th Conf. of Prague Meetings On Macromolecules " Rheology of Polymer Melts", july 1991, Prague, Czechoslovakia ;
73. Leblanc J.L., Rhéologie expérimentale des polymères à l'état fondu, ed. Cebedox, Liège, 1974 ;
74. Lin Y.H., J. Rheol., n°29/1985, pg. 605 ;
75. Lin Y.H., rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 56/1992, pg. 1, 14-th Conf. of Prague Meetings On Macromolecules " Rheology of Polymer Melts", july 1991, Prague, Czechoslovakia;
76. Lupton J., Register J.W., Polymer Eng. and Sci., nr. 5, pg. 235, 1965
77. Marin G., Benallal A., rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 56/1992, pg. 91, 14-th Conf. of Prague Meetings On Macromolecules " Rheology of Polymer Melts", july 1991, Prague, Czechoslovakia ;
78. Massan M., Yahiaoui B., C.R. Acad. Sci. Paris, vol. 308/1989, pg.1681 ;
79. Maucotel J.M., Optimisation du moulage par injection, MCM Cons.Villeurbaine, 1990;
80. Maxwell B., Galt J. C., J. of Polymer Sci., n°62/ 1962, S50 ;
81. Maxwell B., Jung A., Modern Plastics, no. 35/1957, pg. 174 ;
82. McLeish T.C.B, O'Connor K.P., rev. Die Makromol. Chem.- Macromol. Symp. 56, pg.127, 14-th Conf. of Prague Meetings On Macromolecules " Rheology of Polymer Melts", july 1991, Prague, Czechoslovakia
83. Menges G., Mohren P., Guide de construction des outillages d'injection (aprs : Anleitung für den Bau von Spritzgiesswerkzeugen, Carl Hanser Verlag, Munchen), MCM Conseil Villeurbaine, 1990
84. Metzger A. P., Hamilton C. W., SPE Transactions, n°4/1964, pg. 107 ;
85. Metzner A. B., Adv. Chem. Eng., 1, Academic Press, New York, 1956;
86. Metzner A.B., Theor. and Applied Rheol., Elsevier Sci. Publ./1992, pg. 9, XI-th Congr. on Rheol., 1992, Brussels, Belgium ;
87. Migler K.B., Massey G., Hervet H., Léger L., Cahiers de Rheol., Le Mans, 1993, vol.11, no. 3-4, pg. 371 ;
88. Millet F., La mesure des temperatures de l'ambiante à 2500°K, PYC Edition, Paris, 1984 ;
89. Mihail R., Ștefan M. - Simularea proceselor de prelucrare a polimerilor, Editura Tehnică, București, 1989;
90. Mooney M., J. Rheol., n°2/1931, pg. 210 ;

91. Morton M.D., Theor. and Applied Rheol., Elsevier Sci. Publ./1992, pg. 45, XI-th Congr. on Rheol., 1992, Brussels, Belgium ;
92. Mureșan I., Chimia macromoleculor, E.D.P., București, 1967 ;
93. Nagy I., Ultrasunete și utilizarea lor, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1982 ;
94. Okubo S., Hori Y., J. Rheol., n°24/1980, pg. 253 ;
95. Ostwald W., Kolloid Z., n° 36/1925, pg. 99 ;
96. Oyanagi Y., Appl. Polymer Symposium, n°20/1973, pg.123 ;
97. Piau J.M., El Kissi N., Theor. and Applied Rheol., Elsevier Sci. Publ./1992, pg. 70, XI-th Congr. on Rheol., 1992, Brussels, Belgium ;
98. Rabinowitsch B., Z. Phys. Chem., A145, 1, (1929)
99. Ramamurthy A. V., J. Rheol., n°30, 337, (1986)
100. Ramamurthy A.V., Journal of Rheologie, no.30/1937, pg. 1986 ;
101. Reiner M., Amer. S. Math., n° 67/1945, pg. 350 ;
102. Reyne M., Les plastiques – Applications et transformations, ed Hermes, Paris, 1990 ;
103. Rivlin R. S., Proc. Roy. Soc., A193/1948, pg. 260 ;
104. Rozenberg L. D., High - Intensity Ultrasonic Field, Plenum Press, New York, 1971;
105. Rozenberg L. D., Physical Principles of Ultrasonic Technology, vol. I, II, Plenum Press, New York, 1973 ;
106. Rugină I, Winter G., Băjea N., Dimensional Analisis of Ultrasonic System Components Consisting of Sections with Acoustic Impedances Varyng by Steps, rev. Roum. Sci. Tech., Bucuresti, 1994 ;
107. Schaafs W., Molekularakustic, Springer Verlag, Berlin, 1963;
108. Scheffel M., Stiuca P., Dispozitive cu ultrasunete, vol. I, II, Editura Tehnica, Bucuresti, 1989 ;
109. Shin-Ichi M., Journal of materials processing technology, 1994, vol.40, no.3-4, p.443 ;
110. Simionescu C., s.a., Chimie macromoleculara (p.418), E.D.P., Bucuresti, 1985 ;
111. Spencer R. S., Gilmore G. D., Journal of Appl. Phys., 20, 502, (1949);
112. Stan D, Iclănzan T, Abadie M - L'effet de surface dans le cas de l'activation ultrasonique des milieux visqueux sous pression , IV<sup>eme</sup> Coloque Franco-Roumain sur les Polym., 1-3 septembre 1999 , Montpellier , France ;
113. Stan D. Tulcan A. Iclănzan T., Consideratii privind proiectarea matritelor de injectare destinate exploatării în ciclu automat, A VII-a Conf. Internat. de Ing. Manag. si Tehn., Timișoara, 1 - 2 iunie 1995;
114. Stan D., Iclănzan T.- Activarea ultrasonica a curgerii materialului polimeric plastifiat în

proceșele de punere în formă. Comisia de acustică a Academiei Române. caiet 25.

Sesiunea de comunicări București, 17-18 octombrie 1995;

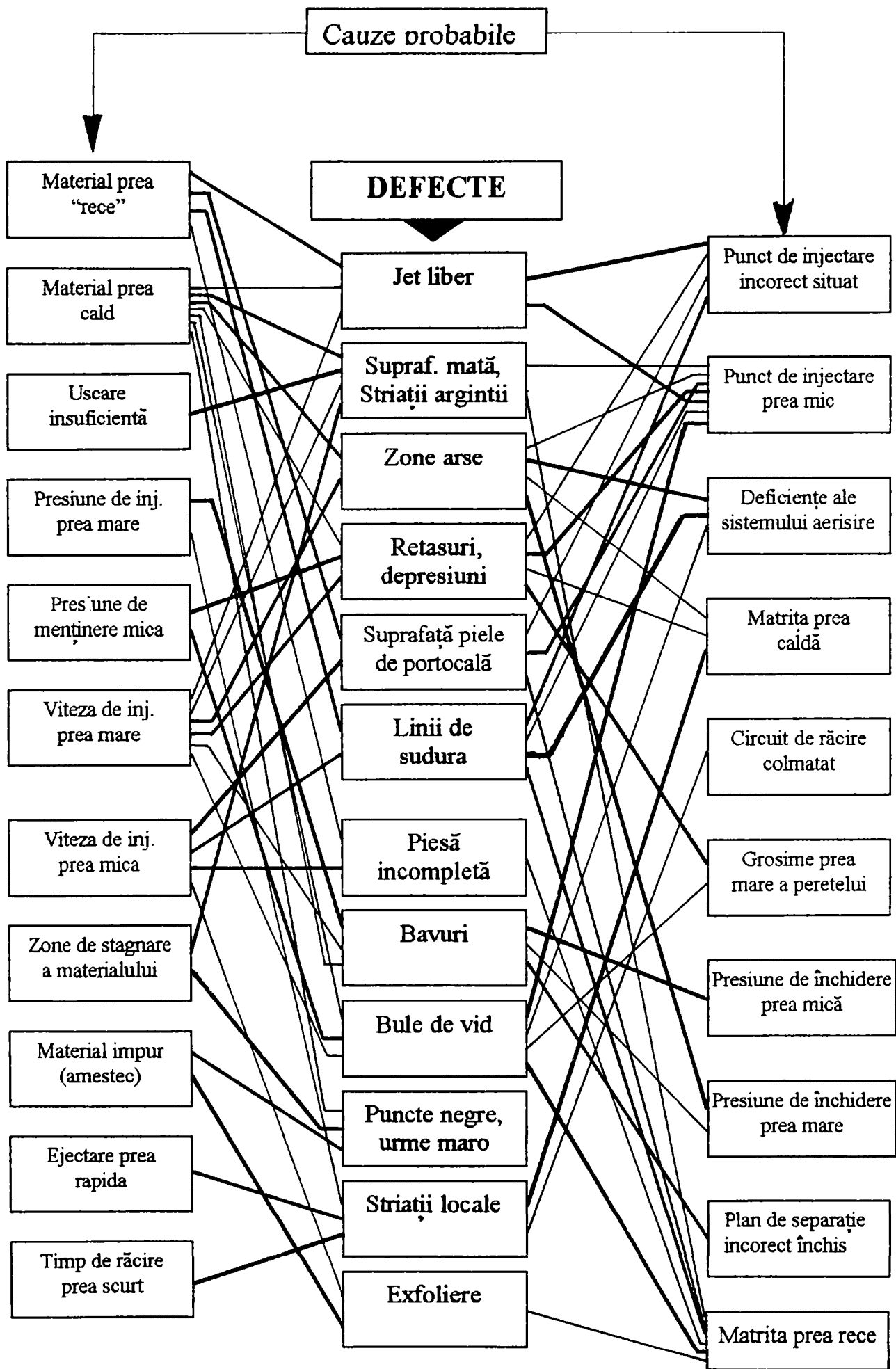
115. Stan D., Iclanzan T., Abadie M - Etude expérimentale des propriétés rhéologiques du PEHD extrudé et activé par ultrasons, Journée de l'école doct. "Matière Condensée", UM 2, France, Montpellier, 4 juin 1998;
116. Stan D., Iclanzan T., Abadie M. – L'influence des ultrasons sur la vitesse d'écoulement lors de l'injection/extrusion de thermoplastique, Journ. de l'école doct., "Matière Condensée", UM 2, France, Montpellier UM 2, 5 juin 1997 ;
117. Stan D., Iclanzan T., Abadie M. - Activation ultrasonique de l'écoulement de thermoplastiques lors des procédés de mise en œuvre par injection ou extrusion, III<sup>ème</sup> Semin. Franco-Roumain sur les Polym., 1-6 septembre 1997, Neptune-Olympe , Roumanie ;
118. Steiner A., C.R. Acad. Sci. Paris, vol. 308/1989, pg.1621 ;
119. Tanner R.I., Engineering Rheology, Oxford, Clarendon Press, 1985;
120. Tulcan A., Stan D., Iclanzan T., Aspecte privind implementarea sistemelor flexibile de fabricație în domeniul presării la rece, A VII-a Conf. Internat. de Ing. Manag. și Tehn., Timisoara, 1-2 iunie 1995;
121. Ubbelohde A.R., Melting and crystal structure, Clarendon Press, Oxford, 1965
122. Van der Pol B., Phil. Mag., 7<sup>th</sup> Series, n°2/1926, pg. 978 ;
123. Van Krevelen D.W., Properties of polymers, Elsevier, Amsterdam, 1990 ;
124. Velceanu C., Metode fizice de investigare a polimerilor, Ed. Stiintif., București, 1992 ;
125. Vergnes B., Thèse de doctorat, Université de Nice, 1985 ;
126. Vinogradov G. V., Malkin A.Y., s.a., J. Polymer Sci., part A-2/1972, vol. 10, pg. 1061
127. Vinogradov G. V., Polymer, n°18/1977, pg. 1275 ;
128. Weill A., Thèse d'Etat de l'Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 1978 ;
129. Westover R. F., S. P. E. Trans., no.1/1961, pg. 14 ;
130. Williams M., Landel R. F., Ferry J. D., J. Amer. Chem. Soc., n° 77/1955, pg. 3701 ;
131. \*\*\* Catalog produse DME, 1993 ;
132. \*\*\* Catalog produse Gunter, 1994 ;
133. \*\*\* Catalog produse Hasco, 1991 ;
134. \*\*\* Catalog produse Heatlock, 1996 ;
135. \*\*\* Ghid rapid pentru cunoașterea materialelor termoplastice, Metalmeccanica Plast. Milano, 1975 ;
136. \*\*\* Modern Plastics Encyclopedia, 1966 ;
137. \*\*\* Polymer Handbook, Elsevier, London, 1988 .

## ANEXE

- ANEXA 1    **Directii de actiune pentru inlaturarea defectelor pieselor injectate.  
Materiale termoplaste de uz industrial.**
- ANEXA 2    **Fora electromotoare termoelectrica pentru diferite materiale utilizate la  
fabricarea termocuplelor.  
Tabele de echivalenta fora electromotoare – temperatura jonctiunii pentru  
termocuple de tip cromel-alumel.**
- ANEXA 3    **Studii comparative ale transductoarelor generatoare de ultrasunete.  
Proprietati si caracteristici ale transductoarelor magnetostrictive si  
piezoelectrice.  
Relatii de calcul si nomograme pentru dimensionarea concentratoarelor  
adaptoare de unda ultrasonica.**
- ANEXA 4    *Matrita de injectare cu canale calde activata ultrasonic – cerere de brevet de  
inventie.  
Procedeu si cap de extrudare cu activare ultrasonica – cerere de brevet de  
inventie.*
- ANEXA 5    **Schema electrica a dispozitivului de temporizare continuu reglabil.  
Indicator de avarie.**

# ANEXA 1





# Materiale termoplaste de uz industrial (Iclanzan [65])

## Poliolefine

Sortimente uzuale	PE Joasă densitate	PE Înaltă densitate	PP	
Denumiri comerciale	HOSTALEN (Hoechst) LACTÈNE (ATO)		HOSTALEN PP (Hoechst) NOVOLEN (BASF) LACTÈNE P (ATO)	
PROPRIETĂȚI	Fizice	Grad de cristalinitate diferit. Opace la grosimi mari și transparente în peliculă. Permeabile la hidrocarburi		
	Mecanice	Foarte sensibile la orientarea macromoleculilor. Sensibile la șoc. PE bună propr. de frecare. PP mai puțin bună		
	Chimice	Bună stabilitate chimică. Insolubile în apă. Utilizabile pentru aplicații alimentare.		
	Electrice	Excelent izolant electric. Factor redus de pierderi dielectrice (PE izolant fire, cabluri)		
	Termice	PE $\rho$ d și PP nesolizitate mecanic suportă temp de 110 - 120 °C		
	Dimensionale	Independență de absorbția de umiditate Polimeri cristalini de contractă ridicată		
CARACTERISTICI	Tensiunea la rupere [MPa]	9 - 12	30 - 35	20 - 40
	Alungirea la rupere [%]	400 - 600	700 - 1000	150 - 600
	Rezistența la îndoire [MPa]	-	-	-
	Rezistența la șoc [kJ/m <sup>2</sup> ]	350 - 1000	60 - 200	-
	Duritatea Shore	51	66	70
	Temperatura de topire [°C]	110 - 120	130	168 - 169
	Temperatura de vitrifiere [°C]	-110	-110	-10
Temperatura de fragilizare [°C]	-70	-70	-	
PROCEDEE DE FABRICARE	MATRITARE ① ② ③ ④	Injectare foaie (160 - 240 °C) ① Contractii importante (2 - 4 %) A se evita suprainjectare pe Ca		
	EXTRUDARE ⑤ ⑥ ⑦	⑤ și ⑥ foarte utilizată		
	CALANDRARE	-		
	TERMIFORMARE ⑧ ⑨	⑨		
	MATRITARE STRATIF. ⑩ ⑪ ⑫ ⑬	-		
	ASAMBLARI ⑭ ⑮ ⑯ ⑰	⑮ și ⑯ (mai puțin prin IF)		
CALITĂȚI	Prelucrare ușoară ① ⑤ ⑥ ... Excelente propr. de izolare electrică și rezist. la șoc. Inerte chimică și utilizabil în aplicații alimentare		Tinută mecanică sup. PE Rezistență la temperatur. Inerte chimică, bun comportament alimentar	
	DEFECTE		Sensibile la ultraviolete Sensibile la fisurare sub sarcină Comportare slabă la temperatură Contractii importante. Lipire imposibilă	
APLICAȚII TIPICE	Pelicle Recipiente menaj Tubulatură suple Jucării	Corpuri cave, Recipiente, Pelicle, plăci de semnalizare	Pelicle de ambalaj Recipiente, conducte Piese auto (b. laterale) Corzi, benzi, fibre	

- ① Injectare ② Injectare-suflore ③ Compresie ④ Transfer ⑤ Extrudare ⑥ Extrudare-suflore  
⑦ Coextrudare ⑧ Semif. subțiri ⑨ Prin rotație ⑩ Joasă presiune ⑪ Înaltă presiune ⑫ Rulare filamen tară  
⑬ Centrifugare ⑭ Mecanice ⑮ Prin presare cu ultrasunete ⑯ Sudare ⑰ Lipire

## Materiale termoplaste de uz industrial (Iclanzan [65])

### Poliesteri saturati

Sortimente uzuale	PETP amorf	PETP orientat	PETP cristalin	PBTP	
Denumiri comerciale	<b>PETP</b> : HOSTAPHAN (Hoechts); MELINEX (ICI); LUREX (Dow) <b>PBTP</b> : CRASTINE (Ciba-Geigy) POCAN (Bayer); VALOX (ATO)				
PROPRIETATI	Fizice	PETP poate fi in stare amorsa sau partial cristalin (30%). Sensibil la umiditate. PBTP este puternic cristalin (60%). Densitate de la 1,3 la 1,66			
	Mecanice	PETP propr. mecanice afectate de pct. de tranzitie vitroasa la 70°C PBTP puternic cristalin; are rigiditate, duritate, rez. la absoareta			
	Chimice	PETP rezistent chimic in general (mai putin vapori de apa, acizi) PBTP rezistent chimic mai putin la apa si solutii apoase			
	Electrice	Bune proprietati electrice in general			
	Termice	PETP cristalin are o buna tinuta termica mai ales cu FS. PBTP este autogestinctor, avind contractii de 2%.			
	Dimensionale	PETP amorf prezinta contractii pina la 1%.			
CARACTERISTICI	Tensiunea la curgere [MPa]	80	200 - 250	60	52
	Alungirea la rupere [%]	3300	5 la 10	90	5 - 250
	Rezistenta la indoire [MPa]	-	-	-	-
	Rezistenta la soc [J/m]	20	-	-	5
	Duritatea Shore	-	-	-	-
	Temperatura de topire [°C]	255	255	255	225
	Temperatura de vitrificare [°C]	73	73	73	60
	Temperatura de fragilizare [°C]	-40	-	-	-40
PROCEDEE DE FABRICARE	MATRITARE ① ② ③ ④	① limitata la obtinerea unor prefabricate pt. PETP ② permeabilit. redusă la CO <sub>2</sub> , recipiente pt. gazeoase			
	EXTRUDARE ⑤ ⑥ ⑦	⑤ ⑥ PETP trebuie bine uscat Extrudare fire: TERGAL, POLYESTER, DACRON			
	CALANDRARE	Posibila prelucrare mecanica prin aschiere			
	TERMOFORMARE ⑧ ⑨	-			
	MATRITARE STRATA ⑩ ⑪ ⑫ ⑬	Posibila sudarea intre ele a firelor trase din PETP (tesaturi, netesute).			
	ASAMBLARI ⑭ ⑮ ⑯ ⑰	⑭	⑮	⑯	⑰
CALITATI	Transparent Propr. chimice si electrice Frecare buna Uzura redusă	Excelente proprietati mecanice Slaba permeabilitate la CO <sub>2</sub>	Tinuta mecanica si mai buna decat starea amorsa	Propr. mec., electr., chimice. Rez. la absoareta. Tinuta termica mai buna ca PETP.	
DEFECTE	Higroscopie Tranzitie vitroasa joasa (70°C)	Sudura CIF imposibila	Opac. Cristalizare dificila	Contractie 2% Sudare CIF imposibila. Slab comportament la fluide „auto” si apa	
APLICATII TIPICE	Semifabricate pt. tragerea firelor. Butelii de apa gazeoasa	Fire trase: TERGAL, POLIESTER Felicule foto, cinema, Izolatoare. Butelii bauturi gazeoase		Plese izolatoare electrice. Carcase, roti dintate, cartere.	

- ① Injectare ② Injectare-suflore ③ Compresie ④ Transfer ⑤ Extrudare ⑥ Extrudare-suflore  
 ⑦ Coextrudare ⑧ Semif. sublin ⑨ Prin rotatie ⑩ Joasa presiune ⑪ Inalta presiune ⑫ Rulare filamentara  
 ⑬ Centrifugare ⑭ Mecanice ⑮ Prin presare cu ultrasunete ⑯ Sudare ⑰ Lipire

## Materiale termoplaste de uz industrial (Iclanzan [65])

### Poliamide

Sortimente uzuale	PA6-6	PA6	PA6 +25% FS	PA 11	PA 12					
Denumiri comerciale	TECHNYL (Rhône-Poulenc); RILSAN, ORGAMIDE (ATO) NYLON, ZYTEL (Dupont de Nemours) DURETHAN, ULTRAMID, MARANYL, SNIAMID, RENYL									
PROPRIETĂȚI	Fizice	Densitate între 1,04 și 1,16 g/cm <sup>3</sup> . Funcțiile de sortiment și grosime sînt translucide pînă la opace. Foarte fluide topite.								
	Mecanice	Printre termoplasticele cele mai rezistente. Sensibile la umiditate. Mediu prea sec le face casante, iar prea umed le plastifiază. Excelente proprietăți de frecare și rezistență la șoc și abraziune.								
	Chimice	Stabă rezistență la apă fierbinte și oxigenată. Bună rezistență chimică. Insensibile la uleiuri, lubrefianți, lacuri, vopsele								
	Electrice	Bun izolator pentru tensiuni pînă la 600 volți și frecvențe inferioare la 400 Hz.								
	Termice	PA sînt foarte fluide. Coeficientul de dilatare termică variază de la 6 la 10 × 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> între -40°C și 77°C.								
	Dimensionate	Ca toți polimerii semicristalini prezintă contracții importante la matrițare. Sensibilitatea la umiditate provoacă umflarea								
CARACTERISTICI	Tensiunea la rupere [MPa]	108 83	103* 77*	110 70	90* 55*	- 160	- 90*	65 53-58	- 65	
	Alungirea la rupere [%]	20 60	20* 300*	25 50	35* 300*	- 5	- 5*	40 300-350	- 250	
	Rezistența la îndoire [MPa]	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Rezistența la șoc [KJ/m <sup>2</sup> ]	158	231*	-	-	-	-	220	300	
	Duritatea Shore	89	82*	85	72*	-	-	-	-	
	Temperatura de topire [°C]	250-260		218-220		215-220		183-187		176-180
	Temperatura de vitritiere [°C]	-		50-60		-		30		55
	Temperatura de fragilizare [°C]	-80	-65*	-	-	-	-	-70	-	
	PROCEDEE DE FABRICARE	MATRIȚARE	① Granulele de PA se usucă în etuve înainte de injectare. PA foarte fluid impune etanșarea matriței.							
		EXTRUDARE	⑤ Reglaj strîns al temperaturilor ± 2°C							
CALANDRARE		-								
TERMOPORMARE		-								
MATRIȚARE STRĂȘTE		⑬ Se practică și acoperiri de protecție sau decorative								
ASAMBLĂRI		⑭ ⑮ ⑯ ⑰								
CALITĂȚI		Bune propr. mecanice: tracțiune, abraziune, șoc, frecare, abraziune Bună rezistență chimică și termică			Compartament bun la temperaturi joase. Slab higroscopice și stabile dimensional. Frecare bună					
DEFECTE	*) Valori pentru PA cu 2,5% apă, corespunzător umidității de 50%. Proprietăți alterate în mediu umed. Prelucrare complicată prin necesitatea uscării și domeniu restrîns al temperaturilor de topire.									
APLICAȚII TIPICE	Reapient, ciocane de tinichigerie și tocuri de pantofi (PA 11), conducte flexibile, echipament de automobile (PA 11), carcase de electromenajere, came. Roți dințate, cuzineți, șuruburi, bielete, întreprîtoare (PA 6-6); medicale (PA 6-6).									

- ① Injectare ② Injectare-suflore ③ Compresie ④ Transfer ⑤ Extrudare ⑥ Extrudare-suflore  
⑦ Coextrudare ⑧ Semi-f. subțiri ⑨ Prin rotație ⑩ Joasă presiune ⑪ Înaltă presiune ⑫ Rulare filamentară  
⑬ Centrifugare ⑭ Mecanice ⑮ Prin presare cu ultrasunete ⑯ Sudare ⑰ Lipire

## Materiale termoplaste de uz industrial (Iclanzan [65])

### Policarbonati

Sortimente uzuale	PC (injectat)	PC (transparent)	PC + 20 % FS	PC + 40 % FS	
Denumiri comerciale	MACROLON (Bayer) ; LEXAN (General Electric)				
PROPRIETĂȚI	Fizice	Polimer amorf, excelent transparent. Densitate 1,2 - 1,52 g/cm <sup>3</sup> cu FS. Material plastic foarte valoros.			
	Mecanice	Comportament quasi-elastic până la rupere. Alungire relativă la rupere redusă. Rezistență la șoc chiar la temperaturi joase. Un larg domeniu al temperaturii de utilizare.			
	Chimice	Slabă absorbție de umiditate (0,2%). Pelicula are permeabilitate pentru gaze. PC nu este afectat de acizi. Propr. alimentare.			
	Electrice	Bune proprietăți izolante, puțin afectate de variațiile de temperatură sau umiditate.			
	Termice	Domeniul de utilizare al PC este larg. Excelent izolant termic printre materialele transparente.			
	Dimensionale	Contractia redusă (< 0,6%). Ținută bună la fluaj mai ales în cazul întăririi cu FS.			
CARACTERISTICI	Înălțimea la rupere [MPa]	67	67	100	160
	Alungirea la rupere [%]	> 110	> 110	4	4
	Rezistența la îndoire [MPa]	-	-	-	-
	Rezistența la șoc [J/m]	640	-	105	-
	Duritatea Shore	83-84	83-84	-	-
	Temperatura de topire [°C]	230-250	-	-	-
	Temperatura de vitrifiere [°C]	150	150	150	150
	Temperatura de fragilizare [°C]	-25	-25	-	-
PROCEDEE DE FABRICARE	MĂTRITARE ① ② ③ ④	Necesară uscarea prealabilă Presiuni de injectare mari. Temp. 260-320°C			
	EXTRUDARE ⑤ ⑥ ⑦	Extrudarea PC de înaltă vâscozitate, plăci, tuburi, profile			
	CALANDRARE	-			
	TERMIFORMARE ⑧ ⑨	⑧ Condiționat de uscarea prealabilă îngrijită la 185-215°C			
	MĂTRITARE STRĂTIT ⑩ ⑪ ⑫ ⑬				
	ASAMBLĂRI ⑭ ⑮ ⑯ ⑰	⑭ ⑮ ⑯ ⑰			
CALITĂȚI	Excelente proprietăți mecanice. Rezistență remarcabilă la șoc între -100 și +135°C. Bune propr. de izolare electrică. Bună stabilitate dimensională chiar și-n mediu umed. Domeniu larg al temp. de utilizare -100, +135°C, calități alimentare, transparent				
DEFECTE	Slabă rezistență la hidrocarburi și detergenți bazici. Prelucrare costisitoare datorită cerințelor de uscare îngrijită. Material scump.				
APLICAȚII TIPICE	Produse electromecanice (carcase, cadrane) electromenajere (filtre de cafea, mixere, veselă), aparatură optică (binoculi, ap. foto), material de protecție transparent (casă, vizieră), vitrină, hublouri, material medical sterilizabil.				

- ① Injectare ② Injectare-suflare ③ Compresie ④ Transfer ⑤ Extrudare ⑥ Extrudare-suflare  
 ⑦ Coextrudare ⑧ Semif. subțiri ⑨ Prin rotație ⑩ Joasă presiune ⑪ Înaltă presiune ⑫ Rulare filamentară  
 ⑬ Centrifugare ⑭ Mecanice ⑮ Prin presare cu ultrasunete ⑯ Sudare ⑰ Lipire

## Materiale termoplaste de uz industrial (Iclanzan [65])

### Policlorura de vinil

Sortimente uzuale	PVC dur	PVC plastifiat	
Denumiri comerciale	HOSTALIT (Hoechst); LACQVYL, ORGAVYL (ATO); CARINA (Shell); LUCALOR; LUCOLÈNE; LUCOREX; LUCOVYL (Rhône - Poulanc); DIOFAN (BASF).		
PROPRIETĂȚI	Fizice	Polimer esențialmente amorf transparent și relativ permeabil la vapori de apă.	
	Mecanice	Excelentă rigiditate până aproape de temperatura de vitrifiere. Excelentă rezistență la abraziune. Fragil la temperaturi joase.	
	Chimice	PVC dur rezistă bine la acizi, baze, ulei, alcool și hidrocarburi. PVC plastifiat este sensibil la lumină și agenți atmosferici.	
	Electrice	Bune proprietăți izolatoare. Pierderi electrice importante	
	Termice	La temperatura ambiantă este rigid. Plastifiantul reduce temperatura de vitrifiere.	
	Dimensionale	Datorită structurii amorphe prezintă o bună stabilitate dimensională și contractii limitate.	
CARACTERISTICI	Tensiunea la rupere [MPa]	50	10-20
	Alungirea la rupere [%]	10-50	200-500
	Rezistența la îndoire [MPa]	70-80	-
	Rezistența la foc [MJ/m <sup>2</sup> ]	-	-
	Duritatea Shore	70-84	20-40
	Temperatura de topire [°C]	160-170	140-170
	Temperatura de vitrifiere [°C]	75-105	-40
	Temperatura de fragilizare [°C]	-	-30
PROCEDEE DE FABRICARE	MATRITARE ① ② ③ ④	① și ②	① și ②
	EXTRUDARE ⑤ ⑥ ⑦	⑤ La PVC rigid mește în inox sau cromat dur	⑥ boteli vin, apă minerală
	CALANDRARE	Fabricarea continuă a peliculelor PVC dur pentru folii de placare sau termoformare	
	TERMOFORMARE ⑧ ⑨	⑧ Termoformare facilă	⑨
	MATRITARE STRONG ⑩ ⑪ ⑫ ⑬	-	-
	ASAMBLARI ⑭ ⑮ ⑯ ⑰	⑮ și ⑰ mai puțin cu US	
CALITĂȚI	Rigiditate bună până la 70°C Stabil dimensional Nu întretine orderea Compatibil pt. alimente Comportament chimic bun	Suplu și utilizabil la joasă temperatură	
DEFECTE	Fragil la temperaturi joase. Sensibil la ultraviolete	Comportament chimic mai slab ca PVC dur. Incompatibil pt. alimente	
APLICAȚII TIPICE	Conducte, fittinguri, racorduri, barete, profile diferite, tuburi	Conducte de apă și gaz, carzi diferite, învelișuri de cabluri	

- ① Injectare ② Injectare-suflare ③ Compresie ④ Transfer ⑤ Extrudare ⑥ Extrudare suflare  
⑦ Coextrudare ⑧ Semif. subțiri ⑨ Prin rotație ⑩ Joasă presiune ⑪ Înaltă presiune ⑫ Rulare filamentară  
⑬ Centrifugare ⑭ Mecanice ⑮ Prin presare cu ultrasunete ⑯ Sudare ⑰ Lipire

## Materiale termoplaste de uz industrial (Iclanzan [65])

### Poliacrilice

Sortimente uzuale	PMMA	A/ MMA	
Denumiri comerciale	Polimetacrilatul de metil ALTULITE, ALTUGLAS (Altular); DIAKON (I.C.I.); LUCITE PLEXIGLAS, PLEXIDUR (Roehm)		
PROPRIETĂȚI	Fizice	Polimer amorf cu proprietăți optice remarcabile Transparentă 92%	
	Mecanice	Dur, rigid și casant la temperatura ambiantă. Rezistența la șoc este relativ redusă. Higroscopic	
	Chimice	Insidă, inodor, cu bune calități alimentare. Rezistență bună la îmbătrânirea sub acțiunea luminii	
	Electrice	Proprietăți electrice afectate de absorbția umidității Rezistență excelentă la descărcări prin arc	
	Termice	Arde lent fără fum excesiv. Contractii reduse. Nu se recomandă inserții metalice. Temp. de utilizare sub 80°C	
	Dimensionale	Din cauza absorbției de umiditate piesele pot prezenta variații dimensionale importante	
CARACTERISTICI	Tensiunea la rupere [MPa]	60 - 70	85
	Alungirea la rupere [%]	4	60
	Rezistența la îndoire [MPa]	-	-
	Rezistența la șoc [mJ/mm <sup>2</sup> ]	10 - 20	40
	Duritatea Shore	-	-
	Temperatura de topire [°C]	210 - 240	-
	Temperatura de vitnifere [%]	110 - 135	95
	Temperatura de fragilizare [°C]	-	-
PROCEDEE DE FABRICARE	MATRITARE ①②③④	① + Suprainjectare	
	EXTRUDARE ⑤⑥⑦	⑤	⑦
	CALANDRARE		
	TERMOFORMARE ⑧⑨	⑧ Cu uscare prealabilă	
	MATRITARE STRAT. ⑩⑪⑫⑬	Posibilă prelucrare mecanică prin așchiere	
	ASAMBLĂRI ⑭⑮⑯⑰	⑮	⑯      ⑰
CALITĂȚI	Transparentă excepțională Rezistență la ultraviolete Suprafață strălucitoare Curgere ușoară, lipire ușoară	Ținută la șoc mai bună ca PMMA. Alungire la rupere mai mare	
DEFECTE	Casant și fragil. Sensibil la zgîrîiere. Rezistență la temperatură limitată (80°C). Rezistență chimică medie.	Nu este convenabilă fabricației obiectelor uzuale	
APLICAȚII TIPICE	Plăci pentru geamuri vitrine. Piese auto, lămpi spate, catadioptri, lentile foto, mobilă, aparatură de desen, cadrane telefonice	Cartere transparente Geamuri de vehicule	

- ① Injectare ② Injectare-suflare ③ Compresie ④ Transfer ⑤ Extrudare ⑥ Extrudare-suflare  
 ⑦ Coextrudare ⑧ Semif. subțiri ⑨ Prin rotație ⑩ Joasă presiune ⑪ Înaltă presiune ⑫ Rulare filamen tară  
 ⑬ Centrifugare ⑭ Mecanice ⑮ Prin presare cu ultrasunete ⑯ Sudare ⑰ Lipire

## Materiale termoplaste de uz industrial (Iclanzan [65])

### Stirenuri

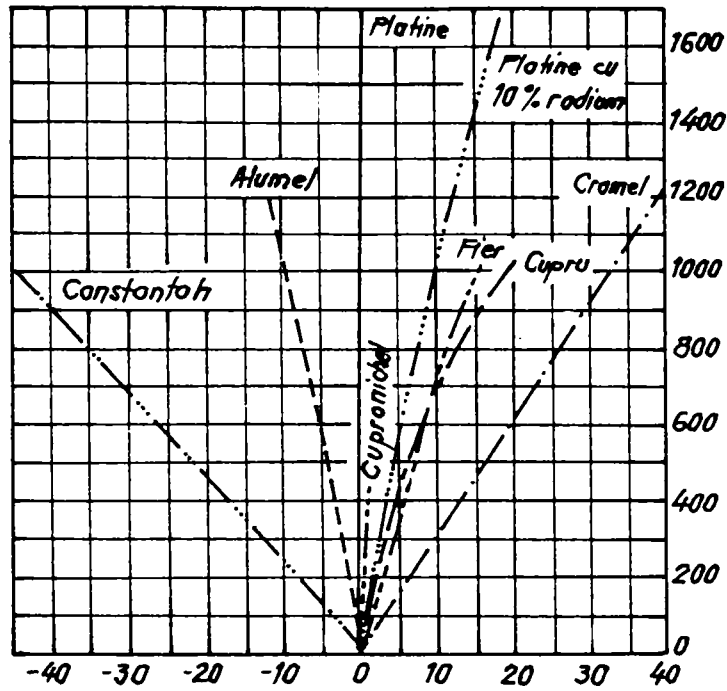
Sortimente uzuale	PS	ABS	SAN	
Denumiri comerciale	HOSTIREN, HOSTAPOR (Hoechst); LACQRENE (ATO) LUSTREX, POLYSTYROL; STYROFOAM; STYRON			
PROPRIETĂȚI	Fizice	PS este un polimer amorf transparent. Modificat cu cauciuc, ABS, devine opac. Permeabilitate ridicată.		
	Mecanice	La temp. ambiantă PS este dur, oasant, fragil și rigid. Proprietățile mecanice se mențin între 40°C și 70°C.		
	Chimice	PS rezistă bine la acizi diluați și soluții saline apoase, dar se umflă în medii organice. ABS și SAN rezistă la hidrocarburi		
	Electrice	Excelente proprietăți izoante. Foarte electrostatic. Pierderi dielectrice slabe.		
	Termice	Datorită hidrogenului și carbonului PS este combustibil		
	Dimensionale	Excelentă stabilitate dimensională. Contractie redusă		
CARACTERISTICI	Tensiunea la rupere [MPa]	41	40-60	70
	Alungirea la rupere [%]	4	20-60	5
	Rezistența la îndoire [MPa]	69	70-80	100
	Rezistența la șoc [kJ/m <sup>2</sup> ]	-	-	-
	Duritatea Shore	-	-	-
	Temperatura de topire [°C]	-	-	-
	Temperatura de vitritare [°C]	90	90	105-115
	Temperatura de fragilizare [°C]	-	-	-
PROCEDEE DE FABRICARE	MĂTRITARE ① ② ③ ④	Recomandabilă uscarea prealabilă, mai ales ptr. ABS		
	EXTRUDARE ⑤ ⑥ ⑦	Posibilă și extrudarea PS expandat Extr. sandwich și bicoloră		
	CALANDRARE			
	TERMOFORMARE ⑧ ⑨	⑧		
	MĂTRITARE STRIN ⑩ ⑪ ⑫ ⑬	Se pot realiza tehnici de imprimare: heliografieră senzografieră offset		
	ASAMBLARI ⑭ ⑮ ⑯ ⑰	⑭ ⑮ ⑯ ⑰		
CALITĂȚI	Rigiditate Stabil dimensional Izolant Contr. reduse Comp. alimentar	Rezist. la șoc Supraf. dură stabilitate dim. Prelucrare ușoară Culori variate	Rezistentă la șoc. Stabilitate dimensională	
DEFECTE	Oasant Slabă rezistență la șoc Electrostatic Slabă rezist. la benzină	Opac Electrostatic	Mai dificil de sudat	
APLICAȚII TIPICE	Ambalaje alimentare Mobilier sanitar Difuzor optic Tocuri pantofi	Carcasa aparate Mobilier, scaune Carenaj ambarcațiuni Piese auto cromate	Carcasa aparate Ap. telefonice	

- ① Injectare ② Injectare-suflare ③ Compresie ④ Transfer ⑤ Extrudare ⑥ Extrudare-suflare  
⑦ Coextrudare ⑧ Semif.subțiri ⑨ Prin rotație ⑩ Joasă presiune ⑪ Înaltă presiune ⑫ Rulare filamentară  
⑬ Centrifugare ⑭ Mecanice ⑮ Prin presare cu ultrasunete ⑯ Sudare ⑰ Lipire



## ANEXA 2

**Forta electromotoare termoelectrica pentru diferite materiale  
utilizate la fabricarea termocuplelor (Millet [88])**



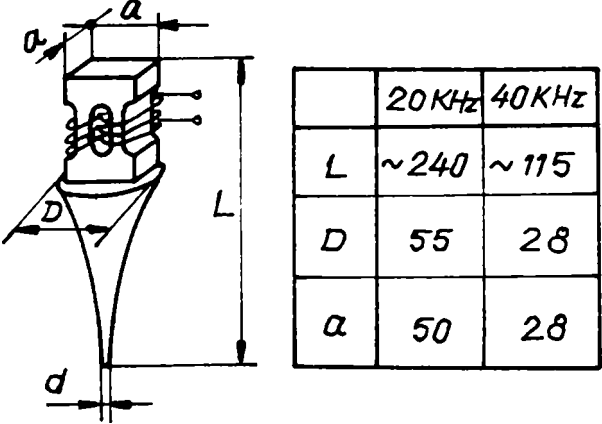
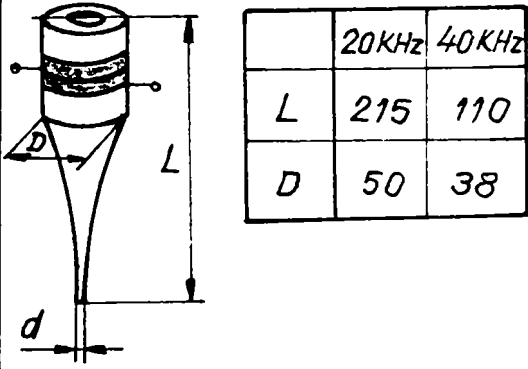
Temp. (°C)	Cromel P (mV)	Alumei (mV)	Cupru (mV)	Fier (mV)	Constantan (mV)	Cupronichel (mV)	Pt-Rh 10% (mV)
- 200	- 3,36	+ 2,39	- 0,19	- 2,92	+ 5,35		
- 100	- 2,20	+ 1,29	- 0,37	- 1,84	+ 2,98		
0	0	0	0	0	0	0	0
+ 100	+ 2,81	- 1,29	+ 0,76	+ 1,89	- 3,51	+ 0,12	0,64
200	5,96	- 2,17	1,83	3,54	- 7,45	0,39	1,44
300	9,32	- 2,89	3,15	4,85	- 11,71	0,83	2,32
400	12,75	- 3,64	4,68	5,88	- 16,19		3,26
500	16,21	- 4,43	6,41	6,79	- 20,79		4,23
600	19,62	- 5,28	8,34	7,80	- 25,47		5,23
700	22,96	- 6,18	10,49	9,12	- 30,18		6,27
800	26,23	- 7,08	12,84	10,86	- 34,86		7,34
900	29,41	- 7,95	15,41	12,84	- 39,45		8,44
1000	32,52	- 8,79	18,20	14,30	- 43,92		9,58
1100	35,56	- 9,58					10,75
1200	38,51	- 10,34					11,94
1300	41,35	- 11,06					13,15
1400	44,04	- 11,77					14,36
1600							16,77

**Tabele de echivalenta forta electromotoare – temperatura jonctiune  
pentru termocuple de tip K (cromel – alumel)  
(Millet [88])**

Fora electromotoare E ( V ) functie de temperatura t ('C)											
t('C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	t('C)
0	0	39	79	119	158	198	238	277	317	357	0
..	...	...	...	...	...	..	...	...	...	...	...
100	4095	4137	4178	4219	4261	4302	4343	4384	4426	4467	100
110	4508	4549	4590	4632	4673	4714	4755	4796	4837	4878	110
120	4919	4960	5001	5042	5083	5124	5164	5205	5246	5287	120
130	5327	5368	5409	5450	5490	5531	5571	5612	5652	5693	130
140	5733	5774	5814	5855	5895	5936	5976	6016	6057	6097	140
150	6137	6177	6218	6258	6298	6338	6378	6419	6459	6499	150
160	6539	6579	6619	6659	6699	6739	6779	6819	6859	6899	160
170	6939	6979	7019	7059	7099	7139	7179	7219	7259	7299	170
180	7338	7378	7418	7458	7498	7538	7578	7618	7658	7697	180
190	7737	7777	7817	7857	7897	7937	7977	8017	8057	8097	190
200	8137	8177	8216	8256	8296	8336	8376	8416	8456	8497	200
210	8537	8577	8617	8657	8697	8737	8777	8817	8857	8898	210
220	8938	8978	9018	9058	9099	9139	9179	9220	9260	9300	220
230	9341	9381	9421	9462	9502	9543	9583	9624	9664	9705	230
240	9745	9786	9826	9867	9907	9948	9989	10029	10070	10111	240
250	10151	10192	10233	10274	10315	10355	10396	10437	10478	10519	250
260	10560	10600	10641	10682	10723	10764	10805	10846	10887	10928	260
270	10969	11010	11051	11093	11134	11175	11216	11257	11298	11339	270
280	11381	11422	11463	11504	11546	11587	11628	11669	11711	11752	280
290	11793	11835	11876	11918	11959	12000	12042	12083	12125	12166	290

## ANEXA 3

Studiu comparativ al transductoarelor generatoare de ultrasunete (Iclanzan [66])

Caracteristici	TRANSDUCTEURS																								
	type magnetostrictif		type electrostrictif																						
	Nickel (foles)	Ferrite ( $NiO \cdot Fe_2O_3$ )	Zirconate titanate de plumb ( $PbTiO_3$ ) <sub>0,45</sub> · ( $PbZrO_3$ ) <sub>0,55</sub>																						
Surface radiante maximale ( $a \times a$ ; $\phi a$ ) [cm <sup>2</sup> ]	25	2 × 12,5	20																						
Puissance specifique admissible [W/cm <sup>2</sup> ]	15 - 100 *	2 - 6	15 - 20																						
Puissance totale en regime de travail sans distorsions [W]	375 - 2500	60 - 100	300 - 400																						
Rendement electroacoustique	0,45	0,25	0,95																						
Dimensions d'encadrement du convertisseur [mm]	 <table border="1" data-bbox="772 1258 1084 1557"> <thead> <tr> <th></th> <th>20KHz</th> <th>40KHz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>~240</td> <td>~115</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>55</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>a</td> <td>50</td> <td>28</td> </tr> </tbody> </table>			20KHz	40KHz	L	~240	~115	D	55	28	a	50	28	 <table border="1" data-bbox="1370 1258 1657 1465"> <thead> <tr> <th></th> <th>20KHz</th> <th>40KHz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>215</td> <td>110</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>50</td> <td>38</td> </tr> </tbody> </table>			20KHz	40KHz	L	215	110	D	50	38
	20KHz	40KHz																							
L	~240	~115																							
D	55	28																							
a	50	28																							
	20KHz	40KHz																							
L	215	110																							
D	50	38																							
Limites	$D_{max} \approx 50$ mm pour éviter les oscillations transversales $d_{min} \approx 5 - 10$ mm pour éviter la diminution de la résistance de la partie terminale du concentrateur et les surcharges.																								
Avantages	Construction simple à réaliser, résistante et fiable. Stabilité en résonance	Les transducteurs en ferrites sont pas chers et facilement à obtenir	Rendement electroacoustique remarquables																						
Inconvénients	Le nickel en foies de 0,1 mm est cher et difficilement à obtenir	Résistance et puissance réduite Facteur de qualité élevé. Faible rendement.	Prix élevé.																						

### Studiu comparativ al transductoarelor magnetostrictive generatoare de ultrasunete (Iclanzan [64])

Material	Criterii de evaluare											total indice de calitate
	probleme de fabricatie	siguranta in functionare	coef. de cuplaj el.-mec.	fragilitate	temp. de lucru	posib. de imbinare prin lipire	disponibilitate in procurare	cost	stabilitatea impedanta	incarcare specifica	pierderi interne	
ferita	4	6	5,5	5	5,5	5	7	6	4	2	2,5	52,5
nichel (Ni)	4	8	12	6	3	5	9	8	5	3	6	69,0
zirconat titanat de Pb – PZT	4	12	3	12	3	10	10	10	7	6	2,3	80,0

Nota: - evaluarea materialelor transductoare din acest tabel s-a facut cu referire la criteriile general valabile in tehnica ultrasunetelor, pe baza tehnicii deciziilor impuse;  
 - aprecierile dupa criteriile referitoare la siguranta in functionare, disponibilitatea in procurare si cost s-au facut cu raportare la situatia pe plan intern.

## Studiu comparativ al transductoarelor piezoelectrice (Iclanzan [64])

Tipul transductorului piezoelectric (punct Curie)	Generator	Interval de frecventa, [kHz]	Caracteristici
cuart (374 °C)	electronic	100÷10.000 armonici	randament bun dar este sensibil la temperatura si are fragilitate mecanica
titanat de bariu (125°C)	electronic	100÷10.000	stabilitate mica la variatia temperaturii
sare Rochelle (24°C)	electronic	0,2+1000	capabil de efort piezoelectric ridicat, dar este instabil la temperatura, solicitari mecanice sau chimice

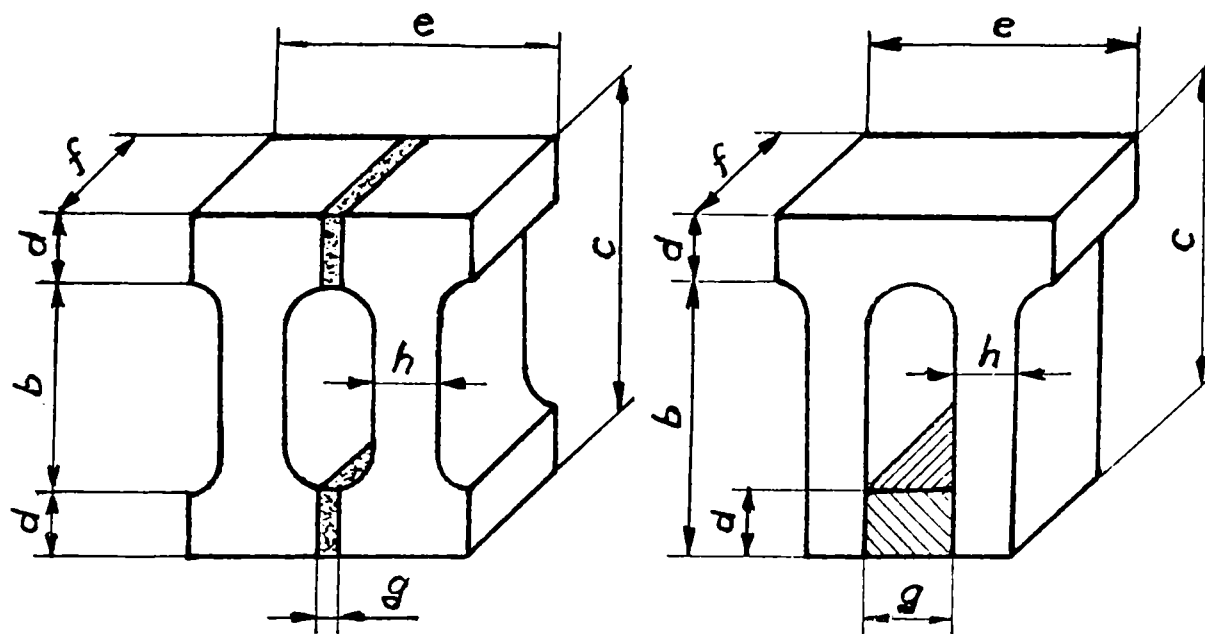
## Proprietati ale unor materiale piezoelectrice (Kuttruff [70])

Material	Viteza de deplasare a undei, $C_L$ , [m/s]	Densitate $\rho$ , [g/cm <sup>3</sup> ]	Constanta dielectrica	Temp. critica $T_c$ , [°C]	Constante piezoelectrice			Factor de cuplaj $k$ , [-]
					$d$ [ $10^{-12}$ As/N]	$e$ [As/N]	$g$ [Vm/N]	
cuart (taiat dupa axa X)	5700	2,65	4,6	576	2,3	0,17	57	0,1
sulfat de litiu	5470	2,06	9	75	16,3	0,66	165	0,3
PZT 5	4350	7,75	1700	365	374	15,8	24,9	0,705
meta-niobat de plumb	3300	6,0	225	570	85	3,2	42,5	0,38
niobat de litiu	7320	4,7	29	1200	9,2	-	-	0,17
oxid de zinc	6400	5,7	8,2	-	12,4	1,57	-	0,48
florura de poliviniliden	2200	1,78	10	80	22	0,14	200	0,16

## Proprietati ale unor materiale magnetostrictive (Kuttruff [70])

Material	Viteza de propagare a undei $C_L$ , [m/s]	Densitate $\rho$ , [g/cm <sup>3</sup> ]	Intensitatea campului magnetic $H_0$ , [A/m]	Permeabilitate relativa $\mu_{rel}$	Factor de cuplaj $k$ , [-]	Rezistenta electrica specifica [ $10^{-6}$ $\Omega m$ ]
nichel moale	4800	8,7	1200	60	0,2	0,07
nichel dur	4750	8,7	remanent	50	0,12	0,07
permalloy (40% Ni)	4000	8,2	600	230	0,17	0,75
cromal (20% Cr, 2...6% Al, Fe)	5000	8	remanent	440	0,1...0,2	1,2
vibroxi - 2 (Ni-Cu-Co-ferita)	5400	5,1	1600	22	0,27	5,1
feroxcube 7A1	-	-	-	-	0,25...0,30	1...10

## Caracteristici ale feritelor magnetostrictive I.F. Urziceni



Frecventa de rezonanta	Tip	Dimensiuni							Greutat e
		b	c	d	e	f	g	h	
20 kHz	2 I-20	61	109 ± 3	24	55 ± 2	25 ± 1,5	4	13	560 ± 10
30 kHz	II 30	69	86 ± 3	17	56 ± 2	25 ± 1,5	15	14	365 ± 10

Caracteristica	Ansamble 2 I 20	Miezuri II 39
Frecventa de rezonanta, [kHz]	19,5 ± 0,4	30 ± 0,8
Factor de cuplaj electromecanic k, [%]	≥ 13	≥ 11
Factorul mecanic de pierderi Q <sub>m</sub>	≥ 150	≥ 150
Factor de conversie electroacustic η, [%]	≥ 70	≥ 70
Tip de material	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Factor de variatie a frecventei cu temperatura	- 5 · 10 <sup>-5</sup>	- 5 · 10 <sup>-5</sup>

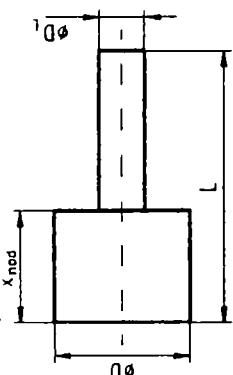
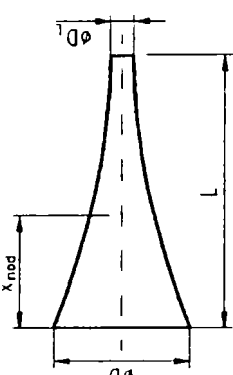
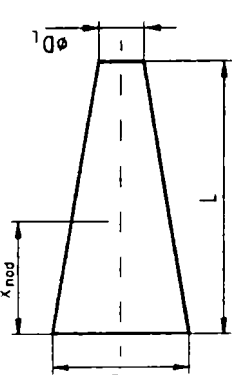
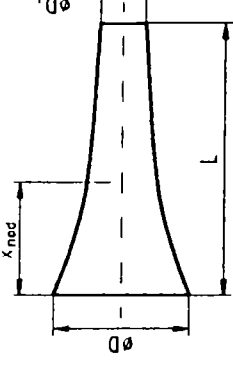


## Caracteristicile tehnice ale transductoarelor piezoelectrice generatoare de ultrasunete de tip TGUS

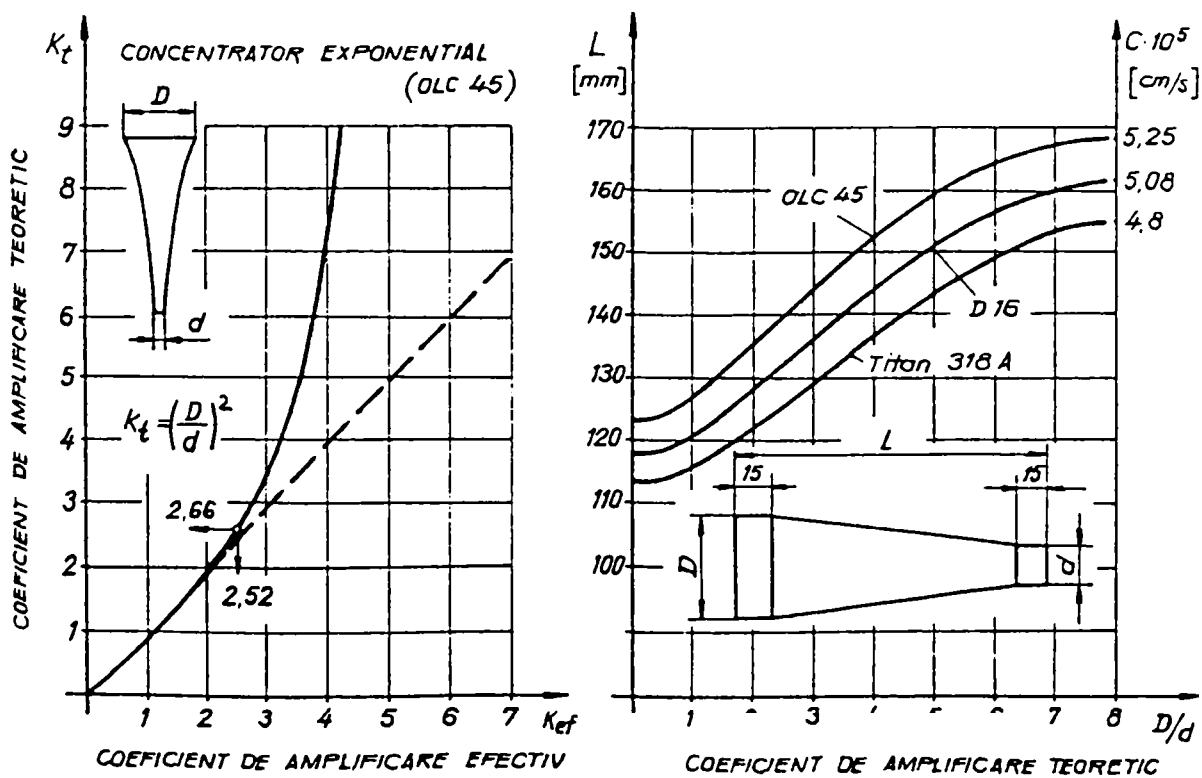
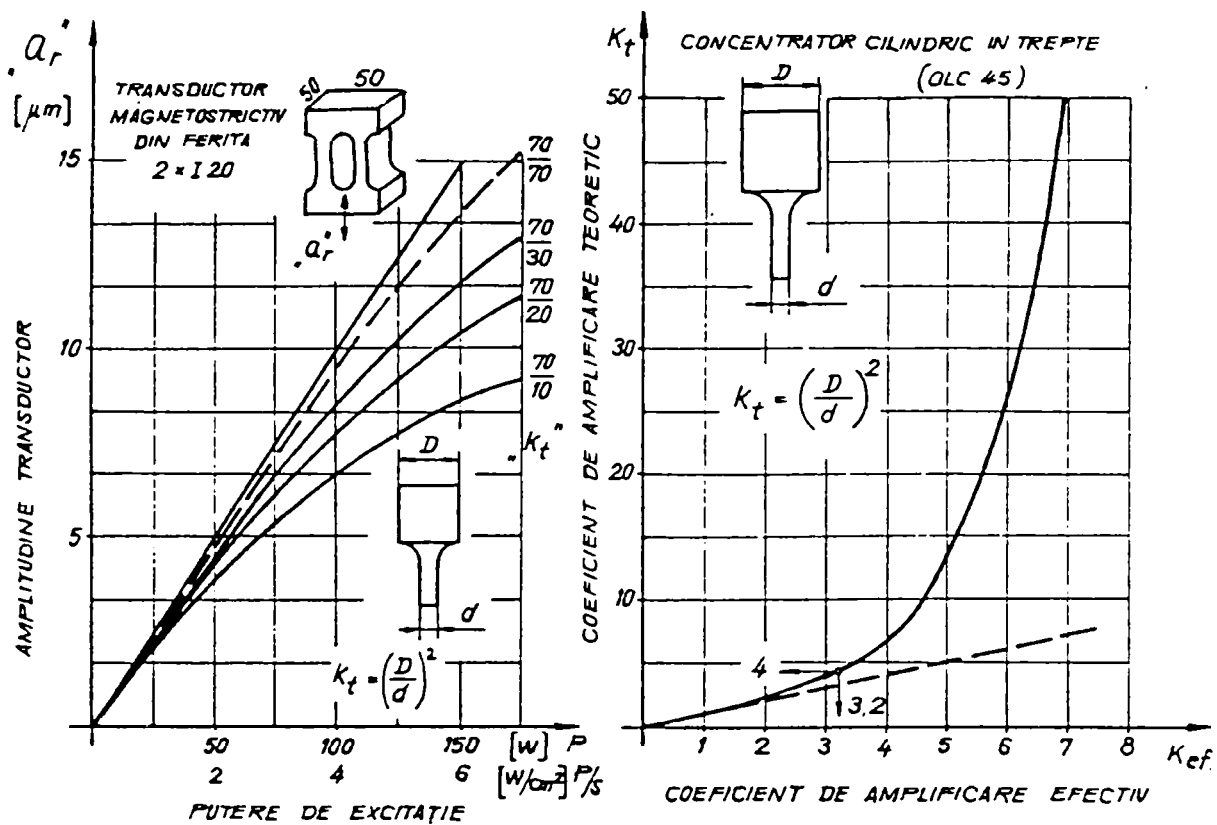
omologate conform STR – 55/1988, realizate la Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Romane

Nr. crt.	Denumirea caracteristicii	Simb.	Unit	Valoare nominala si abateri								
				TGUS 150-040-1	TGUS 150-040-2	TGUS 100-25-2	TGUS 100-20-2	TGUS 300-25-1	TGUS 500-20-1	TGUS 1000-20-1	TGUS 1500-20-1	
1.	Frecventa de rezonanta, serie fundamentala	$f_r$	kHz	$40^{+2}_{-1}$	$40^{+2}_{-1}$	$25 \pm 1$	$20 \pm 1$	$20 \pm 1$	$20 \pm 1$	$20 \pm 1$	$20 \pm 1$	$20 \pm 1$
2.	Frecventa de rezonanta, paralel fundamentala	$f_p$	kHz	$43 \pm 2$	$43 \pm 2$	$27 \pm 2$	$22 \pm 2$	$22 \pm 2$	$22 \pm 2$	$22 \pm 2$	$22 \pm 2$	$22 \pm 2$
3.	Puterea electrica maxima in sarcina	$P_{max}$	W	150	150	100	100	300	500	1000	1500	
4.	Capacitate proprie	$C_0$	nF	$4,2 \pm 0,6$	$4,2 \pm 0,6$	$4,1 \pm 0,6$	$4,1 \pm 0,6$	$4,1 \pm 0,6$	$5,8 \pm 0,6$	$5,3 \pm 0,6$	$11, - \pm 1$	
5.	Tangenta unghiului de pierderi (valoarea maxima)	$tg \delta$	--	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	
6.	Factor de cuplaj efectiv (valoarea minima)	$K_{ef}$	--	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
7.	Factor de calitate mecanic, in aer	$Q_m$	--	15	15	15	15	15	15	15	15	
8.	Eficienta optima (valoarea minima)	$\eta$	%	85	85	85	85	85	85	85	85	

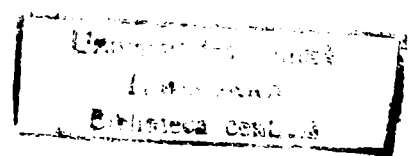
Relatii de calcul pentru dimensionarea concentratoarelor - adaptoare de unda ultrasonica (Iclanzan [64], [67], Dragan [42])

Tipul concentratorului.	in trepte :	exponential :	conic :	catenoidal :
Schita				
Legea de variatie a sectiunii	$D_x = D_0$ pentru $x = 0 \dots \frac{l_k}{2}$ $D_x = d$ pentru $x = \frac{l_k}{2} \dots l_k$	$D_x = D_0 \cdot e^{-\beta x}$ $\beta = \frac{\omega}{C} \cdot \frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}}$ $N = D_0 / d$	$D_x = D_0(1 - \alpha \cdot x)$ $\alpha = \frac{D_0 - d}{D_0 \cdot l_k}$	$D_x = D_0 \cdot chy \cdot (l_k - x)$ $\gamma = \frac{\operatorname{arccch}(N)}{l_k}$
Coefficient teoretic de amplificare a amplitudinii $k_y$ , [-]	$k_y = \left(\frac{D_0}{d}\right)^2 = N^2$	$k_y = \frac{D_0}{d} = N$	$k_y = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot l_k}{\lambda}\right)^2}$ $k_y < N$	$k_y = \frac{N}{\cos(K_1)}$ $k_y > N$
Lungime concentrator, $l_k$ , [cm] (dimensionat in $\lambda/2$ )	$l_k = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f}$	$l_k = \frac{C}{2f} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$l_k = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{k_1}{\pi}$ unde $k_1$ este radacina ecuatiei: $\operatorname{tg}(k_1) = \frac{k_1}{k_1^2 \cdot N + 1}$	$l_k = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \sqrt{(k_1')^2 + (\operatorname{arccch} N)^2}$ unde $k_1'$ este radacina ecuatiei: $k_1' + \operatorname{tg}(k_1') = \sqrt{1 + \frac{1}{N^2} \cdot \operatorname{arccch} N}$
Coordonata axiala a punctului nodal $x_0$ , [cm]	$x_0 = \frac{l_k}{2} = \frac{C}{4f}$	$x_0 = \frac{l_k}{\pi} \cdot \operatorname{arccig}\left(\frac{\ln N}{\pi}\right)$	$x_0 = \frac{1}{k} \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{k}\right)$ $k = \frac{\omega}{\omega_1}$	$x_0 = \frac{1}{k'} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{k'}{\gamma} \cdot \operatorname{ctgh} \lambda\right)$ $k' = \sqrt{k^2 - \gamma^2}$

## Nomograme pentru proiectarea concentratoarelor adaptoare de unda (Iclanzan [66])



# ANEXA 4



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: 97-00026	(61) Perfecționare la brevet: Nr.
(22) Data de depozit: 09.01.1997	(62) Divizată din cererea: Nr.
(30) Prioritate:	(86) Cerere internațională PCT: Nr.
(41) Data publicării cererii: BOPI nr.	(87) Publicare internațională: Nr.
	(56) Documente din stadiul tehnicii:

(71) Solicitant: ICLĂNZAN TUDOR ALEXANDRU, TIMIȘOARA, RO ; STAN DANIEL VOICU, TIMIȘOARA, RO
(72) Inventatori: ICLĂNZAN TUDOR ALEXANDRU, TIMIȘOARA, RO ; STAN DANIEL VOICU, TIMIȘOARA, RO
(74) Mandatar:

(54) MATRIȚĂ DE INJECTARE CU CANALE CALDE ACTIVATĂ ULTRASONIC

(57) Rezumat: Invenția se referă la o matriță de injectare cu canale calde cu un consum relativ scăzut de energie. Matrița, conform invenției, cuprinde un distribuitor (1) central în care este încorporat la nivelul zonei nodale de flanșă, un concentrator - adaptor (2) de undă, care este prevăzut cu un canal racord lateral și respectiv cu un canal de injectare central în care este montat un ac (4) concentrator. Întreg ansamblul este atașat ~~prin lipire~~ de un transductor (3) ~~magnetostriktiv~~ alimentat de către un generator de ultrasunete, astfel că se realizează la nivelul interstițiului format de concentrator-adaptor (2) și acul (4) concentrator efecte de volum și de suprafață.

Revendicări: 1

Figuri: 2

(Se publică figura: 2 )

May 18, 1998

# Matrita de injectare cu canale calde activata ultrasonic

## *Revendicare:*

Matrita de injectare cu canale calde activata ultrasonic caracterizata prin aceea ca in scopul imbunatatirii procesului de injectare si a reducerii consumului de energie foloseste ca duza de injectare un concentrator adaptor de unda cu capatul activ profilat corespunzator (2) care se monteaza la nivelul flansei nodale intr-un distribuitor central (1) de constructie clasica a unei matrite cu canale calde si care are prevazut un canal, racord, lateral si un canal de injectare central in care se monteaza un ac-concentrator (4) cu rolul de a stabili interstitiul de injectare optim, intreg ansamblul fiind atasat prin lipire de un transductor ultrasonic (3) alimentat de generatorul de ultrasunete care furnizeaza energia de activare, realizandu-se, la nivelul interstitiului format de concentrator si acul-concentrator, efecte de volum si de suprafata favorabile optimizarii procesului de injectare.

## *Bibliografie:*

1. Lange I. - Standardized Hot-runner Systems Industrial & Production Engineering no. 2 - 1983
2. Hartmann W - Hot-runner cut costs in twin cavity injection moulding Industrial & Production Engineering no. 1 / 1981
3. Catalog de produse DME si HASCO

(12) **CERERE DE BREVET DE INVENȚIE**

(21) Nr. cerere: 97-01905	(61) Perfecționare la brevet: Nr.
(22) Data de depozit: 15.10.1997	(62) Divizată din cererea: Nr.
(30) Prioritate:	(86) Cerere internațională PCT: Nr.
(41) Data publicării cererii: BOPI nr.	(87) Publicare internațională: Nr.
	(56) Documente din stadiul tehnicii:

(71) Solicitant: ICLĂNZAN TUDOR ALEXANDRU, TIMIȘOARA, RO ; STAN DANIEL VOICU. TIMIȘOARA, RO
(72) Inventatori: ICLĂNZAN TUDOR ALEXANDRU, TIMIȘOARA, RO ; STAN DANIEL VOICU. TIMIȘOARA, RO
(74) Mandatar:

**(54) PROCEDEU ȘI CAP DE EXTRUDERE CU ACTIVARE ULTRASONICĂ**

(57) Rezumat: Invenția se referă la un procedeu și la un cap de extrudere pentru procesarea materialelor vâscoelastice, plastificate prin extrudere sau prin extrudere și suflare. Procedeu, conform invenției, cuprinde activarea ultrasonică care generează efecte de suprafață și de volum la nivelul suprafeței de contact a materialului plastifiat cu peretele canalului de curgere. Dispozitivul, conform invenției, pentru aplicarea procedeuului cuprinde un concentrator - adaptor (2) de unde, în legătură cu care la un capăt poate fi montat cu posibilitate de demontare un vârf (4) prevăzut cu un capăt activ profilat care împreună cu o duză (3) calibrată realizează un interstițiu destinat extruderii materialului, iar la celălalt capăt este atașat un transductor (5) ultrasonic alimentat de către un generator de ultrasunete, plasarea concentratorului - adaptor (2) este făcută la nivelul zonei nodale a unei flanșe aparținând unui dispozitiv (1) de extrudere.

Revendicări: 2  
Figuri: 2

**(Se publică figura: 1)**

May 12, 1998

## Procedeu si cap de extrudare cu activare ultrasonica

### *Revendicare:*

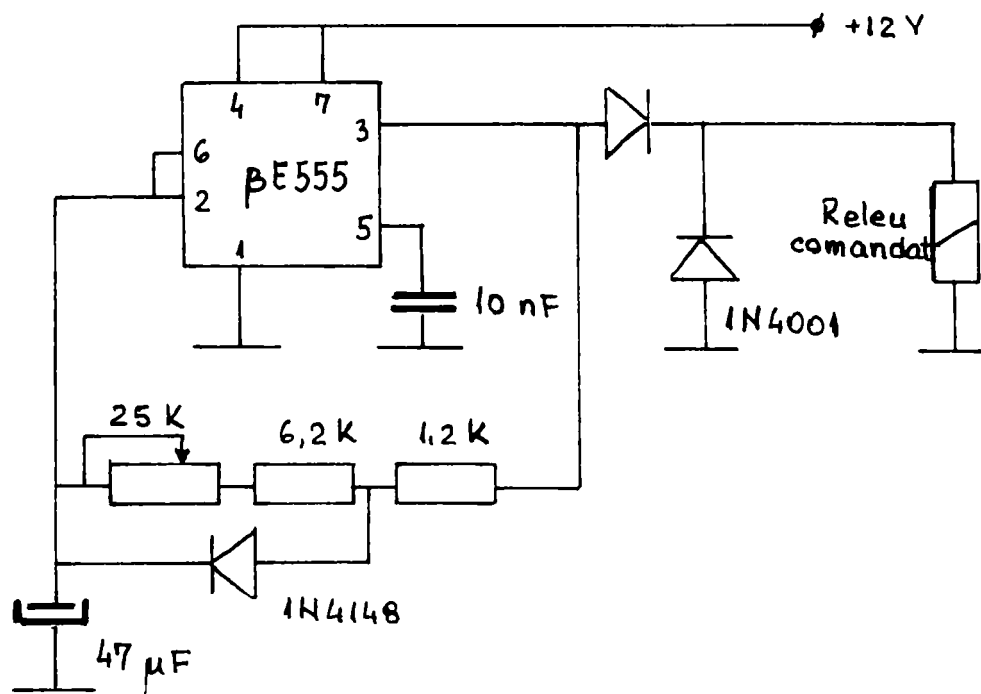
1. Procedeu de extrudare cu activare ultrasonica caracterizat prin aceea ca, pentru crestere a debitului maxim admisibil de extrudare, imbunatatirea proprietatilor de curgere a materialului procesat si a calitatii suprafetelor piesei extrudate se utilizeaza efectele de suprafata si de volum generate de activarea ultrasonica la nivelul suprafetei de contact a materialului plastifiat cu peretele canalului de curgere.
2. Dispozitivul de extrudare cu activare ultrasonica caracterizat prin aceea ca in scopul imbunatatirii parametrilor de regim si de calitate a produsului realizat se foloseste ca element central al capului de extrudare un concentrator adaptor de unda (2) la capatul caruia se poate monta prin insurubare un varf interschimbabil (4) cu capatul activ profilat corespunzator interstitiului de curgere impus de procesul de prelucrare iar la celalalt capat i se ataseaza un transductor ultrasonic (5) alimentat de generatorul de ultrasunete care furnizeaza energia de activare, intreg acest subansamblu fiind montat la nivelul flansei nodale in corpul dispozitivului de extrudare (1) de constructie clasica.

### *Bibliografie :*

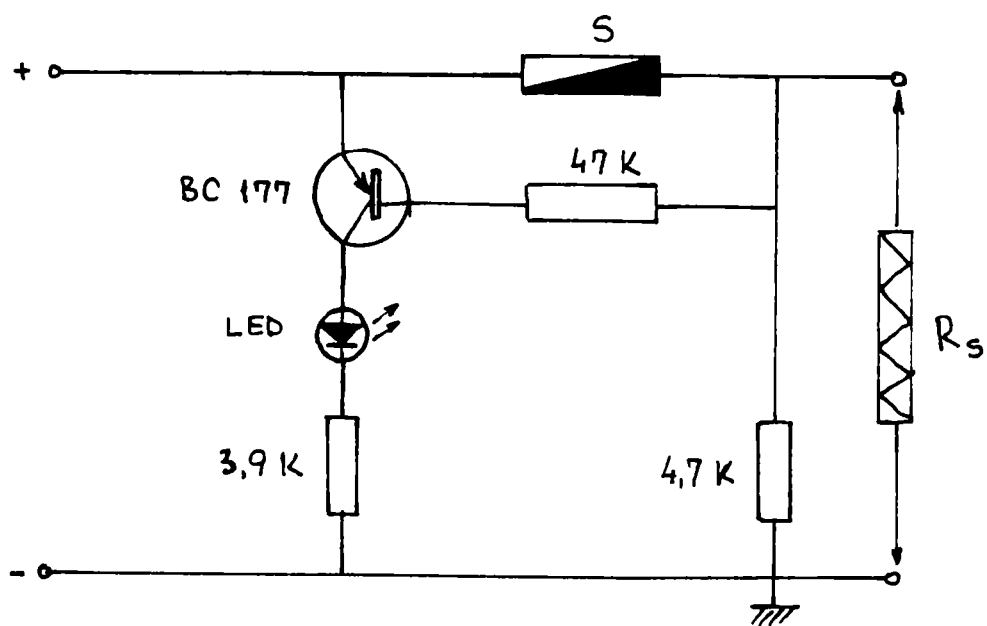
1. Dym J.B. - Injection Molds and Molding - Practical Manual, Van Nostrand Reinhold Comp. , New York, 1987 ;
2. Feher L. - Muanyagfeldolgozas szerszamai , Kecskemet, 1986;
3. Hatzikiriakos S., Dealy J. M., Journal of Rheologie, no. 35 (4), 1991, p. 497;
4. Rozenberg L. D. - High - Intensity Ultrasonic Field, Plenum Pres, New York, 1971 ;
5. Hatzikiriakos Sg., Kalogerakis N ., Rheologica acta, 1994, vol.33, no.1, p. 38 ;
6. Iclanzan T. - Plasturgia - procedee de prelucrare a materialelor plastice, Litografia U.P.Timisoara, 1995;
7. H. El Kissi, L. Leger, J.M. Piau, Rheologie des polymeres fondus - Congres, Paris 1993 - Cahiers de rheologie, , 1993, vol.11, no.3-4 ;
8. Mihail R. , Stefan M. - Simularea proceselor de prelucrare a polimerilor, Ed. Tehnica, Bucuresti,1989 ;
9. Scheffel A., Stiuca N. - Dispozitive cu ultrasunete, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1987.







**Schema electrică a dispozitivului de temporizare continuu reglabil**



**Indicator de avarie**