

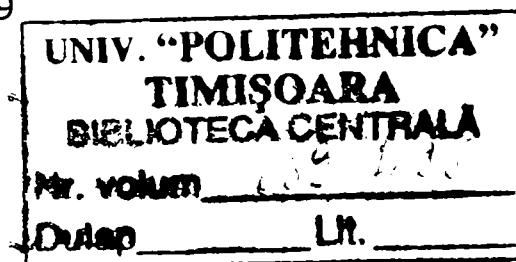
# **CERCETARI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ACTIVAREA CU ULTRASUNETE A PROCESELOR DE CURGERE A MATERIALELOR POLIMERICE**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ  
de către

**Ing. Nicușor Alin Sîrbu**

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Tudor-Alexandru Iclănzan  
Referenți științifici: Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Achimaș  
Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Amza  
Conf.univ.dr.ing. Daniel Stan

Ziua susținerii tezei: 23.01.2009



Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2009

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Volumul prezentat reprezintă rezultatul cercetărilor privind fenomenele caracteristice procedeelor de activare cu ultrasunete în cadrul proceselor de curgere a materialelor polimerice, procedee care se constituie într-o reală alternativă de natură tehnologică a operațiilor de tip injectare și extrudare.

Cercetările și activitățile experimentale au fost realizate, prin utilizarea bazei materiale a Universitatea "POLITEHNICA" din Timișoara, sub îndrumarea directă a d-lui Prof.dr.ing. Tudor ICLĂNZAN, în cadrul catedrei T.C.M. și a ISIM Timișoara, "Centrul de Excelență în Sudarea cu Ultrasunete".

Lucrările realizate au avut ca suport contracte de cercetare încheiate cu CNCIS (contract TD 13 – 182/2007), respectiv ANCS (contract CEEEX 265/2006), ca autorități contractante.

Caracteristica principală a lucrării este reprezentată de tehnicile și metodologiile aplicate în cazul procedurilor experimentale prin utilizarea dotărilor laboratoarelor existente în cadrul Universitatea "POLITEHNICA" din Timișoara (Facultatea de Mecanică – Catedra de Tehnologia Construcțiilor de Mașini și Facultatea de Chimie Industrială și Ingineria Mediului – Departamentul de Chimie Aplicată și Ingineria Compușilor Organici și Naturali) și Institutul Național de Cercetare Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale (ISIM Timișoara), folosind sisteme constructive specifice aplicațiilor realizate, care în mod uzual nu prevăd activarea cu ultrasunete.

Rezultatele obținute reprezintă o reușită din punct de vedere al posibilităților tehnologice, precum și al performanțelor tehnologice prezentate, toate acestea având ca precursor o cercetare a fenomenologiei proceselor de curgere a materialelor polimerice.

Se remarcă de asemenea, datele privind concepția și realizarea ansamblului ultrasonic și a unui dispozitiv de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic ca elemente de bază ale aplicațiilor realizate.

Lucrarea se adresează specialiștilor care lucrează în întreprinderile de profil, respectiv celor din institute de învățământ superior, precum și studenților cu preocupări în acest domeniu.

Ing. Nicușor Alin SÎRBU

Sîrbu, Nicușor Alin

**CERCETARI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ACTIVAREA CU ULTRASUNETE A PROCESELOR DE CURGERE A MATERIALELOR POLIMERICE**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 16, Editura Politehnica, 2009, 198 pagini, 129 figuri, 28 tabele, 10 anexe (30 pagini).

ISSN: 1842-8967

ISBN: 978-973-625-806-0

*Cuvinte cheie:* materiale polimerice, extrudare, calibrare ultrasonică, activare ultrasonică, ameliorarea calității

*Rezumat:*

Materialele polimerice reprezintă o inovație în privința utilizării de materiale noi și totodată un domeniu dezvoltat relativ recent în raport cu alte tipuri de materiale (ceramice, metalice).

Implementarea în cadrul procedeelor clasice (injectarea, extrudarea) de realizare a produselor din materiale plastice a *tehnichilor de activare cu energie electroultraacustică* în procesarea de materiale polimerice a condus la obținerea de *noi tehnologii îmbunătățite* de procesare a materialelor polimerice și deci de *noi direcții de cercetare* în domeniul procesării materialelor polimerice.

Efectele activării ultrasonice pot fi folosite în scopul corectării unor deficiențe funcționale ale dispozitivelor, *îmbunătățirii calității* produselor extrudate, controlului temperaturii în zona învecinată extremității concentratorului (prin reglarea intensității activării ultrasonice, modificării parametrilor 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*.



## **CUPRINS**

INTRODUCERE	11
<b>Capitolul 1 - STADIUL CUNOAȘTERII CU PRIVIRE LA MATERIALELE POLIMERICE</b>	<b>14</b>
1.1 Istoricul materialelor polimerice	14
1.2 Caracterizarea generală a materialelor polimerice	14
1.3 Clasificare materialelor plastice	16
1.4 Importanța economică și evoluția producției de materiale plastice	20
1.4.1 Calitățile materialelor plastice	21
1.4.2 Inconveniente materialelor plastice	22
1.5 Gradul de utilizare al materialelor plastice în tehnică	22
1.6 Polimeri termoplastici	24
1.6.1 Stările fizice ale materialelor polimerice	25
1.6.1.1 Polimeri amorfi	26
1.6.1.2 Polimeri semicristalini	27
1.7 Tehnologii principale de procesare a materialelor polimerice	30
1.7.1 Extrudarea materialelor plastice	31
1.7.2 Injectarea materialelor plastice – matrițarea prin injectare	34
1.8 Concluzii	37
<b>Capitolul 2 - CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE REOLOGICE ALE MATERIALELOR POLIMERICE</b>	<b>38</b>
2.1 Proprietăți reologice ale materialelor polimerice	38
2.1.1 Generalități	38
2.1.2 Corpuri cu comportare ideală	39
2.1.3 Corpuri cu comportare reală, ne-newtoniană	40
2.2 Echipamente speciale de investigare a curgerii materialelor polimerice	44
2.3 Defecte principale apărute în timpul procesării topiturii materialelor polimerice	46
2.3.1 Defectul de tip " <i>piele de rechin</i> " ( <i>sharkskin</i> )	50
2.3.2 Defecte de alunecare intermitentă (sacadată) a topiturii ( <i>stick-slip</i> ) și fracturare masivă a topiturii	53

2.3.3	Defectul de tip spumă	55
2.4	Remedierea defectelor curgerii topiturii polimerice	55
2.5	Concluzii	56
<b>Capitolul 3 - CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND UNDELE ULTRASONICE</b>		<b>58</b>
3.1	Unde acustice	58
3.1.1	Câmpul acustic. Tipuri de undă	58
3.1.2	Mărimi acustice	61
3.2	Construcția generală a sistemelor ultraacustice	62
3.2.1	Părțile componente ale sistemului ultraacustic	62
3.2.2	Clasificarea sistemelor ultraacustice	64
3.2.3	Cerințe ce se impun sistemelor ultraacustice	65
3.2.4	Traductoare electromecanice	65
3.2.4.1	Materiale folosite la construcția traductoarelor electromecanice	66
3.2.4.2	Traductoare magnetostrictive	70
3.2.4.3	Traductoare piezoceramice	72
3.2.5	Transformatoare (concentratoare adaptoare de undă) acustice	76
3.2.5.1	Amplificatorul intermediar (booster-ul)	76
3.2.5.2	Sonotroda (concentratorul adaptor de undă)	77
3.3	Elemente de concepție și realizare a componentelor ansamblului ultrasonic folosind programe software specializate	82
3.3.1	Generalități	82
3.3.2	Medii virtuale pentru modelarea elementelor ansamblului ultrasonic	83
3.4	Efectele ultrasunetelor asupra topiturii polimerice	84
3.4.1	Efectul de suprafață (reducere a frecării)	85
3.4.2	Înmuierea acustică	85
3.4.3	Absorbția energiei undei ultrasonice și transformarea în energie termică	86
3.4.4	Efectul ultrasonic termo-pelicular	86
3.5	Limitările procesului ultrasonic	88
3.6	Posibilități de aplicare a ultrasunetelor în tehnică	89
3.7	Concluzii	89

<b>Capitolul 4 - STADIUL ACTUAL PRIVIND UTILIZAREA ULTRASUNETELOR ÎN PROCESELE DE CURGERE A MATERIALELOR POLIMERICE</b>	91
4.1 Generalități	91
4.2 Stadiul actual al cunoașterii pe plan internațional	91
4.3 Stadiul actual al cunoașterii pe plan național	97
4.3.1 Extrudarea materialelor polimerice activate cu ultrasunete	98
4.3.2 Matrițarea prin injectare a materialelor polimerice activate cu ultrasunete	99
4.4 Concluzii	101
<b>Capitolul 5 - OBIECTIVELE CERCETĂRII</b>	103
5.1 Obiectivele cercetării	103
5.2 Infrastructura de cercetare	104
5.3 Descrierea echipamentelor folosite în cadrul cercetării	105
5.3.1 Echipamentul de determinare a impedanței și a frecvenței la rezonanță	105
5.3.2 Echipamentul de încălzire a dispozitivului ansamblului ultrasonic	106
5.3.3 Echipamentul de monitorizare a temperaturii la nivelul duzei de extrudare și a dispozitivului ansamblului ultrasonic	107
5.3.4 Echipamentul Melt Flow Index (MFI)	108
5.3.5 Calorimetrul diferențial DSC (Diferential Scanning Calorimeter)	109
5.3.6 Microscopul optic Hirox, model KH-1300	110
5.3.7 Blanșa electronică Avery Berkel	110
<b>Capitolul 6 - CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND CONSTRUCȚIA STANDULUI DE ACTIVARE CU ULTRASUNETE A CURGERII TOPITURII MATERIALELOR POLIMERICE</b>	111
6.1 Generalități	111
6.2 Construcția sistemului ultraacustic de activare	112
6.2.1 Construcția generatorului ultrasonic	113
6.2.2 Realizarea ansamblului ultrasonic	114
6.2.2.1 Selectarea unei frecvențe	115

6.2.2.2	Alegerea materialului pentru construcția elementelor convertorului ultrasonic	115
6.2.2.3	Determinarea vitezei de propagare a sunetului în materialul TiGr2	117
6.2.2.4	Calcularea dimensiunilor teoretice folosind programe specializate	117
6.2.2.5	Întocmirea documentației de execuție a ansamblului ultrasonic	121
6.2.3	Realizarea modelelor experimentale și testarea acestora folosind aparatură specializată	121
6.2.3.1	Evaluarea performanțelor sistemului ultraacustic	122
6.3	Factorii de influență în procesul de activare cu ultrasunete	128
6.3.1	Influența temperaturii asupra factorului frecvență de rezonanță	128
6.3.2	Influența mediului polimeric asupra factorului putere transmisă	130
6.4	Construcția standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice	130
6.4.1	Construcția dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic de activare a curgerii materialelor polimerice	132
6.4.1.1	Concepția dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice	132
6.4.1.2	Proiectarea-simularea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic	134
6.4.1.3	Prelucrarea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe centre de prelucrare cu CNC	135
6.4.1.4	Asamblarea și verificarea funcțională a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic la activarea cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice	137
6.4.2	Echipamentul de injectare-extrudare a materialelor polimerice. Montarea și testarea dispozitivului ultrasonic	137
6.4.3	Testarea generatorului de ultrasunete	139
6.5	Stabilirea elementelor de caracterizare a experimentului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice	140
6.5.1	Stabilirea și monitorizarea intervalului temperaturii de lucru	140

6.5.2	Stabilirea ordinului de mărime pentru presiunea de extrudare	141
6.5.3	Stabilirea volumului cilindrului extruderului și a tipului de extrudare	141
6.5.4	Stabilirea limitelor dimensionale ale interstițiului de curgere și a geometriei duzei de extrudare	142
6.5.5	Stabilirea planului experimental	144
6.6	Concluzii	144
<b>Capitolul 7 - CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ACTIVAREA CU ULTRASUNETE A CURGERII TOPITURII MATERIALELOR POLIMERICE</b>		146
7.1	Material pentru experimentare	146
7.2	Analiza rezultatelor și trasarea suprafețelor de răspuns prin metoda celor mai mici pătrate	151
7.3	Metode experimentale de investigare a cercetării	156
7.3.1	Determinări experimentale cu ajutorul Melt Flow Index (MFI)	156
7.3.2	Determinări experimentale cu ajutorul calorimetrului diferențial (DSC)	156
7.4	Concluzii	157
<b>CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE</b>		159
8.1	Concluzii generale	159
8.2	Contribuții personale	159
8.3	Direcții ulterioare de cercetare	160
<b>BIBLIOGRAFIE</b>		161
<b>ANEXE</b>		169
A1	Istoricul materialelor polimerice	170
A2	Studiu comparativ al transductoarelor generatoare de ultrasunete	173
A3	Cel mai des întrebuințate tipuri de concentratoare cu elementele de calcul necesare	174
A4	Abrevieri ale unor materiale plastice uzuale	175
A5	Analize pirometrice (proba de ardere)	176

A6	Forma programului de prelucrare a elementelor dispozitivului de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic pe mașini cu comandă numerică	177
A7	Rezultate experimentale – Experiment de tip A	180
A8	Rezultate experimentale – Experiment de tip B	185
A9	Rezultate experimentale – Experiment de tip C	190
A10	Rezultatele experimentale ale tranziției de stare a polimerului folosind analiza DSC (Differential Scanning Calorimeter)	195

## INTRODUCERE

Plecând de la cuvintele cheie din titlu și începând cu materialele polimerice, putem spune că acestea reprezintă o inovație în privința utilizării de materiale noi și totodată un domeniu dezvoltat relativ recent în raport cu alte tipuri de materiale (ceramice, metalice).

Producția mondială de materiale plastice s-a accelerat în ultimii 40 de ani, cu o regularitate uimitoare, producțiile dublându-se la fiecare 5 ani și cu o tendință certă de creștere permanentă a acesteia.

Necesitățile unei societăți moderne stimulează dezvoltarea intensivă de materiale plastice, consacându-le în multe ramuri ale activității umane și generând prin aceasta noi activități directe sau indirecte legate de producerea și gestionarea acestora precum și activități de cercetare privind tehnologii cât mai perfecționate de producere a acestor materiale. La ora actuală, utilizarea materialelor plastice se face la scară mare, ele regăsindu-se în producerea materialelor de construcții, mobilierului, ambalajelor, produselor electrocasnice, textilelor, în produse ale industriei de automobile, navale, aeronautice, aerospațiale, în agricultură, medicină, artă, publicitate ș. a.

În cadrul pieței globale extrem de competitive, fabricanții caută în mod constant noi metode de reducere a timpului de fabricație și respectiv de îmbunătățire a calității unui nou produs. Tehnicile de activare cu energie electroultaacustică aplicate în procesele de curgere a materialelor polimerice oferă soluția acestei probleme.

Această lucrare de doctorat propune un subiect care este inclus într-un domeniu de vârf al cercetării internaționale, respectiv cel al activării cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice în procesele de formare.

**Obiectivul principal** al prezentei lucrări este caracterizarea comportării curgerii din punct de vedere al creșterii relative de debit și respectiv de ameliorare a defectelor pentru diferite tipuri de materiale polimerice în urma activării acestora cu ultrasunete în procesele de extrudare, cu posibilități de aplicare și în cazul injectării, cu mare impact asupra productivității și calității produselor.

Energia ultrasonoră exercită asupra topiturii de materiale polimerice efecte de reducere a vâscozității și creștere a fluidității materialelor topite la injectarea/extrudarea polimerilor, degazarea topiturii, având ca efect obținerea unor suprafețe de foarte bună calitate, productivitate ridicată, structură omogenă, precizie dimensională ridicată și lipsite de tensiuni interne. Principalele activități abordate în cadrul cercetărilor vizează: studierea proceselor de curgere a materialelor polimerice; studiul activării ultrasonice a proceselor de curgere a materialelor polimerice; realizarea de dispozitive și echipamente de activare cu ultrasunete a proceselor de curgere.

Cu rezultate deosebite se aplică prelucrarea dimensională cu **ultrasunete** în aeronautică, în industria constructoare de mașini, în ceasornicărie și elemente de mecanică fină, în industria aparatelor medicale și de cercetare etc.

Implementarea în cadrul procedeelelor clasice (injectarea, extrudarea) de realizare a produselor din materiale plastice a **tehnicilor de activare cu energie**

**electroultraacustică** în procesarea de materiale polimerice a condus la obținerea de **noi tehnologii îmbunătățite** de procesare a materialelor polimerice și deci de **noi direcții de cercetare** în domeniul procesării materialelor polimerice.

Activitățile de cercetare dictate de tendințele manifestate pe plan mondial în acest domeniu sunt de extindere a aplicațiilor și valorificare a cunoștințelor și principiilor utilizării tehnicilor neconvenționale de activare cu energie electro-ultraacustică.

Efectele activării ultrasonice pot fi folosite în scopul corectării unor deficiențe funcționale ale dispozitivelor, **îmbunătățirii calității** produselor extrudate, controlului temperaturii în zona învecinată extremității concentratorului (prin reglarea intensității activării ultrasonice, modificării parametrilor 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**.

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 ultrasonică drept un mijloc de ameliorare și/sau control al proprietăților de curgere și a productivității pentru procedeele de punere în formă.

Prezenta teză de doctorat este structurată pe șapte capitole, al căror conținut reflectă **cuvintele cheie** din titlu, respectiv două capitole de sinteză privind **materialele polimerice și proprietățile reologice** ale acestora, două capitole de sinteză cu privire la construcția, utilizarea și respectiv stadiul actual al cunoașterii privind **ultrasunetele**, un capitol de obiective și două capitole de experimentări, respectiv de construcție a standului experimental și de realizare a cercetărilor de **activare cu ultrasunete** a curgerii topiturii de HDPE (polietilenă de înaltă densitate), urmate de un set de concluzii generale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare, precum și de un număr de zece anexe.

**Capitolul I**, intitulat "**Stadiul cunoașterii cu privire la materialele polimerice**", prezintă o sinteză a cunoștințelor actuale cu privire la materialele polimerice. S-a realizat o caracterizare generală a acestor materiale precum și o clasificare a lor după mai multe criterii (proveniență, metode de preparare, natura lanțului macromolecular, comportarea termomecanică, performanță, grad de utilizare etc.). Un alt aspect abordat în cadrul acestui capitol se referă la importanța economică și evoluția producției de materiale polimerice cu punerea în evidență atât a avantajelor oferite de utilizarea acestora cât și a inconvenientelor lor. De asemenea, materialele polimerice sunt prezentate și din punct de vedere al gradului de utilizare în diferite domenii de activitate dar și sub aspectul tehnologiilor de procesare.

**Capitolul II**, intitulat "**Cercetări teoretice și experimentale privind proprietățile reologice ale mediilor polimerice**", reunește cunoștințe actuale cu privire la proprietățile reologice ale materialelor polimerice și echipamentele de investigare utilizate. De asemenea, se prezintă principalele tipuri de defecte apărute în timpul procesării topiturii mediilor polimerice și condițiile în care se manifestă aceste defecte, respectiv modalitățile de remediere a acestora.

**Capitolul III**, intitulat "**Cercetări teoretice și experimentale privind undele ultrasonice**", prezintă o descriere și o clasificare a tipurilor de unde acustice, cu referire specială asupra undelor ultrasonice de interes pentru cercetarea de față și se prezintă mărimile acustice ce le caracterizează. Sunt descrise elementele ce alcătuiesc ansamblul ultrasonic, materialele folosite la construcția acestuia, cât și modalitățile de obținere a formelor și dimensiunilor elementelor ce intră în structura ansamblului ultrasonic folosind modele matematice, sau prin metode rapide de



calculare folosind programe software specializate. De asemenea, sunt prezentate efectele ce pot să apară la activarea cu ultrasunete a topiturii de polimer, limitările procesului de activare cu ultrasunete și posibilitățile de aplicare în tehnică a acestora.

**Capitolul IV** se intitulează "**Stadiul actual privind utilizarea ultrasunetelor în procesele de curgere a mediilor polimerice**" și reprezintă o sinteză a cunoașterii utilizării ultrasunetelor în procesele de curgere a materialelor polimerice la nivel mondial. Necesitățile unei societăți moderne stimulează dezvoltarea intensivă a tehnicilor de activare cu ultrasunete a topiturii polimerice, interesul pentru acest domeniu al științei fiind de mare actualitate, reflectat în numeroase lucrări științifice, brevete de invenție și proiecte de cercetare. Sunt prezentate rezultatele celor mai notabile cercetări în domeniu, unele dintre acestea găsindu-și aplicabilitate industrială.

În **capitolul V, "Obiectivele cercetării"**, se prezintă argumentele care au stat la baza fundamentării studiului, scopul urmărit fiind *cercetarea teoretică și experimentală a efectelor activării cu ultrasunete (creștere de debit și ameliorare a defectelor) în procesele de curgere a materialelor polimerice folosind echipamente ultrasonice de tip industrial (generator + ansamblu convertor ultrasonic), echipament de injectare de tip industrial și dispozitive de adaptare, respectiv facilități (softuri de aplicație dedicate) care să permită integrarea eficientă a celor de mai sus în definirea unei tehnologii aplicabile*. Sunt descrise etapele necesare atingerii obiectivului propus și infrastructura de cercetare utilizată.

**Capitolul VI, "Cercetări experimentale privind construcția standului de activare cu ultrasunete a curgerii topiturii mediilor polimerice"**, tratează aspecte privind concepția și construcția elementelor ce intră în alcătuirea standului de activare a curgerii mediilor polimerice cu ultrasunete, destinat dezvoltării inovative de noi tehnologii în domeniul procesării materialelor polimerice, scopul urmărit fiind de ameliorare a defectelor apărute în urma procesării mediilor polimerice folosind metode clasice de extrudare și injectare. Se prezintă etapele ce sunt necesare a se parcurge în vederea amplasării ansamblului ultrasonic pe mașina de procesare prin intermediul unui dispozitiv de curgere și instalare. S-au stabilit condițiile și parametrii utilizați în cadrul experimentărilor.

**Capitolul VII** se intitulează "**Cercetări experimentale privind activarea cu ultrasunete a curgerii topiturii mediilor polimerice**" și cuprinde rezultatele experimentărilor propuse prin tematica de doctorat. Se prezintă caracteristicile materialului ales pentru cercetare, condițiile de experimentare și metode de investigare și interpretare a rezultatelor cercetării.

**"Concluzii, contribuții personale și direcții ulterioare de cercetare"**. Cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat se finalizează cu o serie de concluzii generale desprinse în urma experimentărilor și pune accentul pe contribuțiile personale aduse prin tematica propusă, trasând unele direcții ulterioare de cercetare.

În final, doresc să mulțumesc d-lui Prof.dr.ing. Tudor Alexandru ICLĂNZAN pentru coordonarea tezei de doctorat și sprijinul acordat pe tot parcursul derulării acesteia, colectivului Catedrei de T.C.M. a Facultății de Mecanică Timișoara, conducerii și echipei din cadrul "Centrul de Excelență în Sudarea cu Ultrasunete" ISIM Timișoara, precum și tuturor celor care m-au susținut în elaborarea acestei cercetări.

# CAPITOLUL I

## STADIUL CUNOAȘTERII CU PRIVIRE LA MATERIALELE POLIMERICE

### 1.1. Istoricul materialelor polimerice (plastice)

Societatea modernă este caracterizată prin utilizarea intensivă și extensivă a materialelor ce pot fi cuprinse în următoarele categorii:

- materiale metalice;
- materiale ceramice și minerale;
- materiale lemnoase;
- materiale plastice;
- materiale compozite.

Au trecut mai bine de o sută de ani de când John Wesley Hyatt a pus piatra de fundație a industriei de materiale plastice, realizând primul material plastic. În anul 1862, John Wesley Hyatt, ca urmare a unui mic anunț care propunea un premiu de 10.000 de dolari celui care va găsi un material capabil să înlocuiască bilele de biliard de fildeș, realizează prima sinteză obținând celulozidul, descoperire brevetată cu brevetul nr. 105 338 din 12 iulie 1870 [ICL 04] [KUN 61].

Până la începutul anilor '70, sectorul materialelor plastice a avut o dinamică fără precedent. La fiecare cinci ani s-a dublat producția mondială de materiale plastice. Premisa pentru această creștere cantitativă atât de rapidă a fost expansiunea economică generală, precum și progresele realizate în producția și tehnologia polimerilor.

Anii de recesiune 1974 și 1975 au marcat, pe plan mondial, o creștere evidentă pentru industria materialelor plastice.

Majorările prețurilor la petrol și recesiunea din această perioadă au inițiat, ceva mai devreme și mai sensibil, sfârșitul acestei etape de evoluție. Chiar fără acești factori suplimentari de frânare din exterior, industria materialelor plastice se afla la mijlocul anilor '70 în fața unui moment hotărâtor. Toate domeniile principale și de importanță economică pentru utilizarea materialelor plastice au fost între timp epuizate. Evoluția tehnică, atât în ceea ce privește materia primă, cât și tehnologia de prelucrare și instalațiile necesare, a atins acel stadiu în care succesele erau și sunt posibile și în continuare, dar numai cu pași mici și cu cheltuieli tot mai mari [JAK 88].

Istoria producerii diferitelor materiale polimerice este prezentată în anexa A1 [OLI 08].

### 1.2. Caracterizarea generală a materialelor plastice

Materialele plastice sunt materiale obținute pe bază de polimeri, în general sintetici, a căror prelucrare sub formă de produse finite se face la temperaturi la care aceste materiale devin plastice. La temperatură și presiune normală aceste materiale sunt relativ dure, puțin elastice și lipsite de proprietăți plastice [ȘER 02].

Elementul constitutiv de bază al materialelor plastice îl reprezintă polimerii organici (naturali, artificiali, sintetici) sau substanțele macromoleculare. Polimerii organici stau la baza constituirii mai multor grupe importante de materiale cu utilizare industrială [ICL 04]:

- materiale plastice (polietilenă, policarbonat, polistiren, PVC, teflon etc.);
- fibre sintetice (nylon, acrilic etc);
- elastomeri (cauciuc natural, policloropren);
- vopsele (produse pe bază de soluții sau emulsii de polimeri);
- adezivi (soluții sau emulsii de polimeri).

Schema de principiu a sintezei polimerilor organici este redată în figura 1.1.

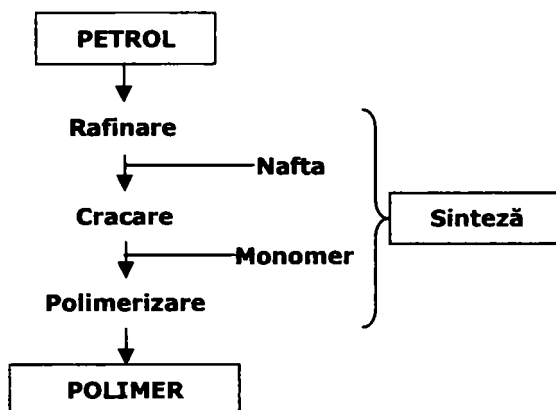


Figura 1.1. Etapele sintezei polimerilor organici

Câteva exemple de obținere a polimerilor din monomeri sunt prezentate în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Exemple de obținere a polimerilor din monomeri [VLA 03]

Monomer		Polimer	
Etilenă	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Polietilenă	$-\left[\text{CH}_2-\text{CH}_2\right]_n$
Propilenglicol	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Polipropilenă	$-\left[\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\text{CH}}\right]_n$
Clorură de vinil	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Poli (clorură de vinil) (PVC)	$-\left[\text{CH}_2-\overset{\text{Cl}}{\text{CH}}\right]_n$
Metilmetacrilat	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C} = \text{O} \\   \\ \text{O} - \text{CH}_3 \end{array}$	Poli (metilmetacrilat) (PMMA)	$-\left[\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{COOCH}_3\right]_n$

Polimerul este deci o substanță chimică pură rezultată în urma unei polimerizări, constituit din molecule gigant denumite macromolecule.

Macromoleculele nu au aceeași lungime. Într-un gram de produs există, în general, mai multe milioane de lanțuri macromoleculare de lungimi diferite [ȘER 02].

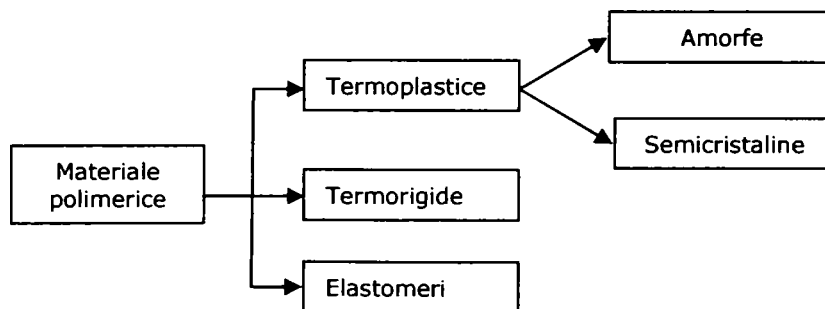
### 1.3. Clasificarea materialelor plastice

Materialul plastic reprezintă un amestec de unul sau mai mulți polimeri cu aditivi, care conferă proprietățile particulare necesare fabricării și utilizării [ICL 04].

Clasificarea materialelor plastice se face în funcție de mai multe criterii, niciunul cu valoare absolută datorită faptului că există multe puncte de interfață între ele.

Clasificările materialelor plastice după criteriile cele mai utilizate sunt:

- **Clasificarea materialelor plastice după proveniență** [CLE 87]:
  - *polimeri naturali* (celuloză, cauciuc, amidon etc.);
  - *polimeri artificiali* (celuloid, galalit, ebonită etc.);
  - *polimeri sintetici* (polipropilenă, polimetilmetacrilat).
- **Clasificarea materialelor plastice după metodele de preparare a produselor macromoleculare de bază** [NUJ 83]:
  - *materiale plastice polimerizate*, obținute în urma unui proces de polimerizare;
  - *materiale plastice policondensate*, ce iau naștere datorită unui proces de policondensare;
  - *materiale plastice modificate*, ce iau naștere prin transformarea chimică a unor produși macromoleculari naturali care își conservă structura macromoleculară inițială și după reacția chimică.
- **Clasificarea în funcție de natura lanțului macromolecular** [CLE 87]:
  - *polimeri carbocatenari* – au lanțul macromolecular alcătuit numai din atomi de carbon;
  - *polimeri heterocatenari* – au lanțul macromolecular alcătuit din alți atomi (oxigen, azot, sulf, siliciu etc.).
- **Clasificarea în funcție de comportarea termomecanică**, care ține seama de variația deformației unui polimer sub sarcină constantă funcție de temperatură, conform schemei din figura 1.2 [ȘER 02]:



**Figura 1.2.** Clasificarea materialelor polimerice funcție de comportarea termomecanică

- *materiale termoplastice* (materiale reciclabile) – rigide la temperatura ambiantă. Creșterea temperaturii provoacă înmuierea și prin răcire se rigidizează din nou. Procesul este unul reversibil (figura 1.3).

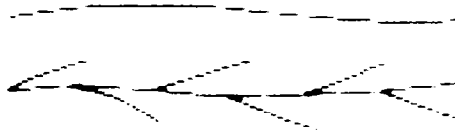


Figura 1.3. Structura schematizată a polimerilor termoplastici [OLI 07]

- *materiale termorigide* (materiale nereciclabile) – rigide la temperatura ambiantă. Creșterea temperaturii provoacă o descompunere ireversibilă (figura 1.4).



Figura 1.4. Structura schematizată a polimerilor termorigizi [OLI 07]

- *elastomerii* – sunt polimeri sau materiale plastice care au un comportament asemănător cu cel al cauciucului la temperatura mediului ambiant (figura 1.5).

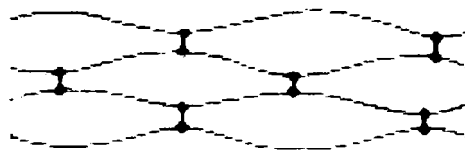


Figura 1.5. Structura schematizată a elastomerilor [OLI 07]

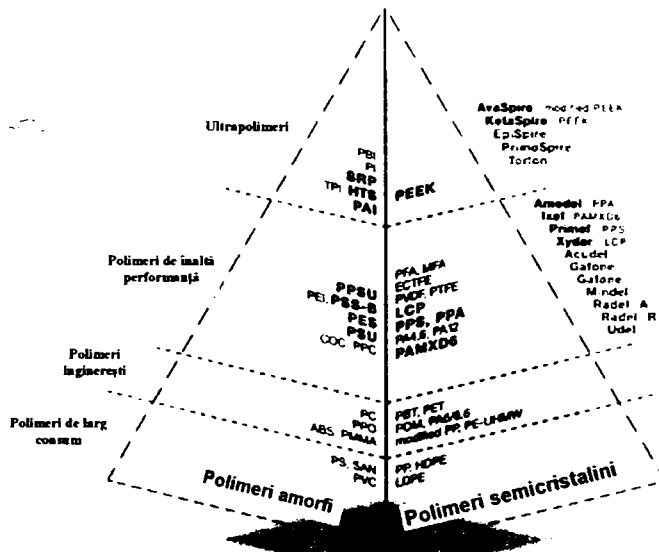
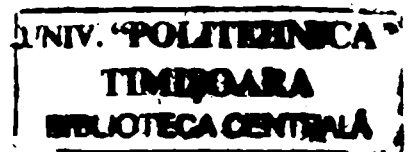


Figura 1.6. Clasificarea polimerilor funcție de performanță [PTO 01]

659.695



- **Clasificarea funcție de clasa de performanță** [PTO 01] – figura 1.6:
  - *polimeri de larg consum;*
  - *polimeri ingineresti (tehnopolimeri);*
  - *polimeri de înaltă performanță;*
  - *ultrapolimeri.*
- **Clasificarea materialelor polimerice după structură (după forma lanțului molecular al polimerului)** [OLI 07]:
  - *polimeri liniari:*
    - homopolimeri;
    - copolimeri;
  - *polimeri ramificați;*
  - *polimeri cu ciclu în lanț;*
  - *polimeri tridimensionali.*

**Polimerii liniari.** Sunt filiformi în realitate și monodimensionali, corespund înlănțuirii unităților structurale în lanțuri flexibile și lungi ce pot fi asemănați cu spaghetele. Astfel de structuri găsim la PE, PVC, PA și polifluorocarburi.

Un polimer este un compus obținut printr-o înlănțuire a unui număr mare de molecule simple denumite monomeri.

Monomerul este o moleculă cu un aranjament particular al elementelor C, H, O, N, rar Cl, S, Si. Procesul chimic de înlănțuire, de formare a unei macromoleculă de polimer, se numește polimerizare și constă dintr-o suită de reacții chimice identice prin care la început două molecule de monomeri formează un dimer ca apoi adăugând a treia moleculă să se obțină un trimer și așa mai departe până la formarea polimerului. Începând de la treizeci de molecule de monomeri înlănțuite se utilizează termenul de polimer pentru desemnarea materialului plastic [ICL 04].

Numărul de aranjamente sau unități monomerice constituite într-o moleculă definesc gradul de polimerizare (DP). Dacă  $DP > 30$  avem definită o macromoleculă (de exemplu DP este de ordinul a 300 - 600 în nylon); dacă  $DP < 30$  se definește un oligomer cum ar fi un dimer pentru  $DP = 2$ , un trimer pentru  $DP = 3$ , ș.a.m.d. Urmărind reacțiile de sinteză se poate spune că o substanță macromoleculară este un amestec de macromoleculă de aranjament similar, dar al căror grad de polimerizare și deci masă molară moleculară sunt diferite [ICLA 04].

Dimensiunile moleculei unui polimer pot fi caracterizate fie prin masa moleculară ( $M$ ), fie prin gradul de polimerizare (DP). Din mai multe motive, un polimer este totdeauna un ansamblu de molecule (înlănțuiri) de lungimi diferite și ca atare trebuie să se utilizeze valori medii pentru a le caracteriza:

$$M_n = \frac{\sum M_i N_i}{\sum N_i}, \text{ masa moleculară medie în număr} \quad (1.1)$$

$$M_w = \frac{\sum M_i^2 N_i}{\sum M_i N_i}, \text{ masa moleculară medie în greutate} \quad (1.2)$$

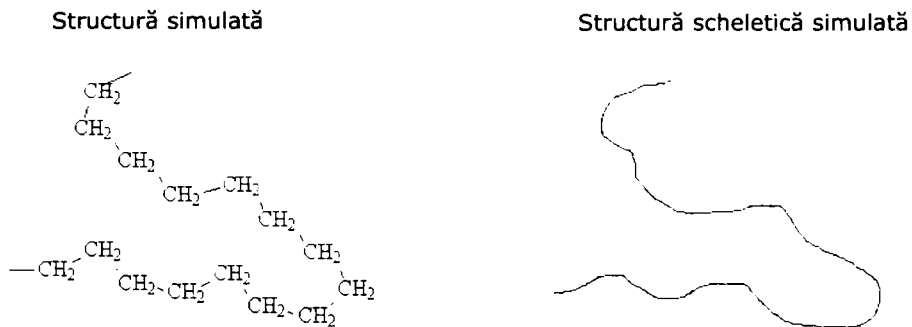
în care  $N_i$  reprezintă numărul de molecule de masă moleculară  $M_i$  într-un eșantion dat.

Dacă toate moleculele ar avea aceeași masă moleculară, raportul  $M_w/M_n$  este totdeauna superior lui 1 putând ajunge la 10 sau chiar 20 în anumiți polimeri liniari.

Într-o reacție de polimerizare se poate utiliza un singur monomer, de exemplu etilena, rezultând un *homopolimer*. Când lanțurile conțin mai mulți monomeri diferiți în înlănțuire, avem *copolimeri* [ICL 04].

Unele molecule de polimeri sunt liniare. Un exemplu este polietilena de înaltă densitate (HDPE) care poate să conțină mai mult de 1000 de grupări  $\text{CH}_2$ .

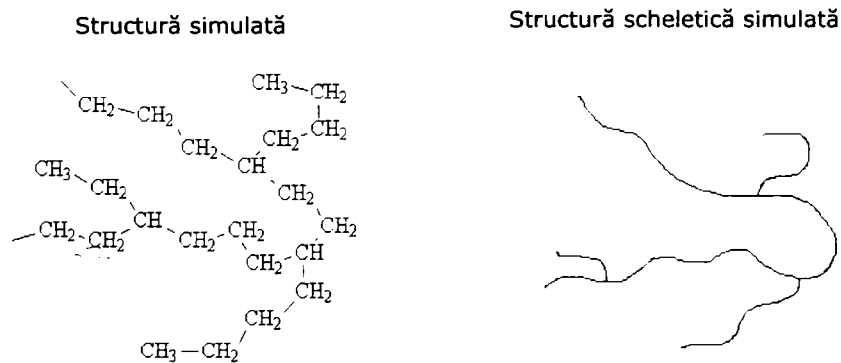
Structurile simulate ale HDPE sunt prezentate în figura 1.7. Structura scheletică arată doar coloana polimerului [USC 01]. HDPE are o densitate mare întrucât moleculele liniare se pot grupa foarte strâns.



**Figura 1.7.** Structura polimerilor liniari [USC 01]

**Polimeri neliniari (ramificați).** Au pe lanțul principal conectate ramuri laterale. Posibilitatea de împachetare a lanțului este redusă, ceea ce are ca rezultat reducerea densității polimerului. Polimerii liniari pot rezulta cu un grad oarecare de ramificare, funcție de metoda de sinteză folosită (de exemplu, PE).

Unii polimeri, cum ar fi polietilena de joasă densitate (LDPE), au catene neregulate, de diferite mărimi spațiate, de-a lungul lanțului. Acești polimeri sunt denumiți ca fiind neliniari. Structurile simulate ale LDPE sunt prezentate în figura 1.8 [USC 01]:

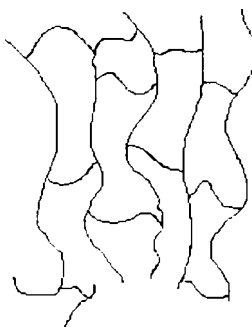


**Figura 1.8.** Structura polimerilor ramificați [USC 01]

Ramificația nu permite moleculelor neliniare să se împacheteze atât de aproape ca cele liniare, reducând astfel densitatea acestora.

Unii polimeri au legături încrucișate între lanțurile de polimer creând astfel rețele tridimensionale. O densitate mare de legături încrucișate restricționează mișcarea lanțurilor și conduce la un material rigid.

O structură scheletică a unui astfel de polimer cu o densitate ridicată a legăturilor încrucișate este prezentată în figura 1.9.



**Figura 1.9.** Structură scheletică a unui polimer cu densitate ridicată a legăturilor încrucișate [USC 01]

**Polimeri cu ciclu în lanț** [OLI 07]

- sunt foarte rigizi și rezistă foarte bine la temperaturi înalte;
- în anumite cazuri sunt mult prea rigide.

**Polimerii tridimensionali** - sunt acei polimeri care se constituie într-o rețea spațială generând ceea ce se numește o "moleculă gigant", legăturile covalente puternice dintre lanțuri împiedicând separarea acestora. Acești compuși termoduri sunt insolubili și infuzibili. În funcție de nivelul solubilității are loc mai întâi o expansiune și apoi o solubilizare parțială; are loc așadar un proces de gelificare (insolubil și nefuzibil) [ICL 04].

Proprietățile unui polimer sunt puternic influențate de lungimea lanțurilor polimerice (și de fapt de măsura acestora) exprimată prin gradul de polimerizare DP, respectiv greutatea moleculară.

De asemenea, proprietățile unui polimer nu depind numai de masa sa moleculară și de configurația lanțului ci și de diferențele structurale ale lanțurilor care de cele mai multe ori depind de metoda de sinteză folosită [ICL 04]:

#### **1.4. Importanța economică și evoluția producției de materiale plastice**

Producția mondială de materiale plastice s-a dezvoltat în ultimii 40 ani într-un ritm accelerat, de o uimitoare regularitate, având o creștere medie de 15 %, ceea ce a asigurat practic dublarea producției la fiecare 5 ani [ICL 04].

Producția mondială de polimeri a crescut de la 27 de milioane tone pe an în 1975 la 200 milioane tone pe an și este într-o continuă creștere. Creșterea industriei de polimeri este datorată combinațiilor unice ale proprietăților polimerilor care includ formare și fabricare ușoară, densitate scăzută, rezistență la coroziune, izolare electrică și termică și adesea rigiditate și rezistență pe unitate de greutate favorabile [VLA 03].

În prezent materialele plastice nu mai sunt considerate materiale de substituie, ci ele alcătuiesc o clasă proprie de materiale [FLO 85].

Materialele plastice, datorită proprietăților lor mecanice și electrice, în afară de faptul că au dus în multe domenii la înlocuirea metalelor, au permis și rezolvarea unor probleme de mare importanță în domeniul de vârf al tehnicii, cum ar fi construcțiile aerospațiale, construcția automobilelor, electronică, electrotehnică ș.a. [CLE 89].



### 1.4.1. Calitățile materialelor plastice

Principalele cauze care au influențat dezvoltarea continuă a materialelor plastice, competitivă față de materialele tradiționale, au la bază unele avantaje precum [PLA 83]:

- producția materialelor tradiționale nu crește în ritmul creșterii demografice nefiind, în măsură să acopere necesarul de consum;
- materiile prime necesare fabricării materialelor plastice sunt în general ușor accesibile;
- consumul de energie pe unitatea de produs finit din materiale plastice este inferior celui necesar obținerii aceluiași produs din materiale tradiționale;
- uzinarea polimerilor în produse finite se realizează cu costuri de producție mai mici decât uzinarea produselor tradiționale în aceleași produse finite, deoarece implică utilaje și tehnologii mai simple, de mare productivitate și manoperă mai puțină;
- proprietățile materialelor polimerice permit utilizarea lor în foarte multe domenii cu rezultate superioare utilizării produselor obținute din materiale tradiționale precum și în aplicații în care materialele tradiționale nu pot fi utilizate;
- tendințele noi în domeniul tehnologiilor de prelucrare a materialelor plastice duc la micșorarea cheltuielilor pe unitatea de produs și la soluționarea problemelor de readucere în circuitul economic a materialelor plastice devenite deșeuri.

La calitățile evidente, mai sus remarcate, nu rareori se adaugă și avantajele conferite de aspectul și coloritul plăcut sau de rezistență la coroziune și inerția chimică [ICL 04].

**Tablelul 1.2.** Consumul de energie în kg echivalent țiței pentru a produce 1dm<sup>3</sup>de diverse materiale [CLE 89]

Nr. Crt.	Produsul	Consumul de energie și materii prime (kg echivalent țiței)
1	100 saci pentru ambalarea îngrășămintelor confecționate din:	
	Hârtie	39
	Polietilenă de joasă densitate	36
2	100m țevi rezistente la presiune (Ø=25mm) din:	
	Oțel	500
	Cupru	96
	Polietilenă de înaltă densitate	38
3	100m conducte de drenare (Ø=100mm) din:	
	Fontă	1970
	Ceramică	275
	Policlorură de vinil	154
4	100 butelii de 1 litru din:	
	Sticlă	23
	Polietilenă de înaltă densitate	12
	Policlorură de vinil	8

Din datele publicate [CLE 89], se observă că pentru producția de materiale plastice este necesar un consum mai redus de energie decât la metale (tabelul 1.2).

De asemenea, eficiența materialelor plastice derivă și din greutatea lor specifică, tabelul 1.3.

**Tabelul 1.3.** Consum de energie și materii prime necesare pentru a produce unele produse [CLE 89]

<b>Materiale</b>	<b>Consumul de energie în kg echivalent țiței pentru a produce 1dm<sup>3</sup> de material</b>
Aluminiu	16
Cupru	11
Oțel	8
Stiren și copolimeri	2
Polistiren	1.9
Polietilenă de înaltă densitate	1.8
Policlorură de vinil	1.7
Polipropilenă	1.5
Polietilenă de joasă densitate	1.5

### 1.4.2. Inconveniențele materialelor plastice

În ciuda dezvoltării intensive a produselor din materiale plastice, acestea nu pot înlocui în totalitate materialele tradiționale (oțel, ceramică, lemn). Inconveniențele materialelor polimerice sunt prezentate în ordinea importanței lor:

- majoritatea materialele plastice prezintă rezistență mecanică relativ scăzută, neputându-se utiliza la piesele supuse la solicitări mecanice ridicate;
- materialele plastice sunt în majoritate nebiodegradabile, ceea ce conduce la serioase probleme privind protecția mediului (poluarea), implicând politici strategice de recuperare a materialelor plastice și reciclare a acestora;
- majoritatea materialelor plastice se aprind relativ ușor și prin ardere degajă gaze toxice.

### 1.5. Gradul de utilizare al materialelor plastice în tehnică

Materialele plastice au cunoscut în special în ultimele două decenii o masivă diversificare din punct de vedere al domeniilor în care își găsesc aplicabilitatea. Acestea pot fi utilizate ca înlocuitori ai unor materiale precum oțelul, aluminiul, cuprul etc. sau ca materiale de sine stătătoare în construcția unor repere.

Materialele polimerice se utilizează frecvent în diverse domenii de activitate precum: industria de automobile și aviație, în construcții civile, bunuri de larg consum, ambalaje etc., înlocuind cu succes materialele tradiționale (tabelul 1.4, 1.5 și 1.6) [FLO 85].

**Tabelul 1.4.** Perspectivile principalelor domenii de utilizare a materialelor plastice ca înlocuitori ai oțelului [FLO 85]

Sectorul industrial	Utilizări	Polimeri înlocuitori ai oțelului
Automotive	Bare de protecție Elemente de caroserie, capote de motor, uși Caroserii de rulote	PP, PA ABS, PP PA, PETP, POM, PC, PPO
	Aripi, băi de ulei, capace de chiulasă, faruri Rezervoare de carburant Măști de radiator Tablouri de bord	PA, PETP, POM, PC, PPO HDPE ABS, PP ABS, PP, PPO
Material rulant	Elemente de caroserie	PA, PETP, POM, PC, PPO
Construcții navale	Bărci de pescuit, remorchere Suprastructuri	PA, PPO, POM PA, POM, PVC
Mobilier	Dulapuri de toaletă	PS, PP
Lăcătușerie	Articole de fierărie, broaște	POM, PA
Decorațiuni interioare	Decorațiuni pentru corpuri de iluminat Profile decorative Jaluzele	PS PVC, PMMA PVC
Echipeamente pentru drumuri	Bănci, semne de circulație	PVC, PS
Organe de mașini	Lagăre, roți dințate mici	POM, PA
Construcții de cazane	Rezervoare	PVC, PP, PPO
Articole de uz casnic	Suporturi, cilindri, capace Cuve pentru frigidere Diverse articole	ABS, PP, PPO PS, ABS PS, PP
Echipeamente de birou	Corpuri de mașini	PS, PP
Jucării	Modele	PS, PE, ABS
Fotografie-cinematografie	Casete, bobine, carcase	PS
Ambalaje și transport	Benzi de legătură Butoaie, căzi, rezervoare, bidoane de ulei și produse chimice, cutii de vopsele Doze de pulverizat Cutii de conserve, butelii, capsule	PA, PP HDPE, PP  PE, PP PVC, HDPE, PP

**Tabelul 1.5.** Perspectivile principalelor domenii de utilizare a materialelor plastice ca înlocuitori ai aluminiului [FLO 85]

Sectorul industrial	Utilizări	Polimeri înlocuitori ai aluminiului
Automotive	Măști de radiator Carburatoare, pompe de benzină Suporturile lămpilor de poziție	ABS, PP PA SAN, PMMA
Construcții navale	Suprastructuri	PA, POM
Biciclete, motociclete	Căști de protecție, aripi	PE, PP
Construcții civile	Stâlpi și rame de ferestre, jaluzele Profile decorative	PVC PS
Organe de mașini	Elemente constructive, carcase, angrenaje	PA, POM, PPO, PETP, PC
Fotografie-cinematografie	Carcase de aparate și piese mecanice	PA, ABS
Jucării	Miniaturi	PS
Tehnica transportului	Cutii și lăzi, rezervoare de lapte Cutii de cosmetice, tuburi medicamente Duze de pulverizat	HDPE, PVC HDPE HDPE, PP, POM
Articole de fierărie	Armături, piese de lăcătușerie Mânere, inele, ornamente	PA, POM ABS

**Tabelul 1.6.** Perspectivile principalelor domenii de utilizare a materialelor plastice ca înlocuitori ai cuprului, zincului și plumbului [FLO 85]

Materialul înlocuit	Sectorul industrial	Utilizări	Polimeri înlocuitori
Cupru	Construcții civile	Conducte de apă și gaze Armături	PVC, PE, PP PPO, POM
	Construcții de vehicule	Rezervoare de apă pentru radiator	PPO, PA
	Ceasornicărie	Diferite piese, roți dințate, lașăre	POM, PPO, PA
Zinc	Construcții civile	Jgheaburi, grătare de ventilație Piese turnate din zamac	PVC PA, POM
Plumb	Construcții civile	Conducte de apă și gaze	PVC, PE, PP

Cu toate că pe plan mondial există o largă varietate de sortimente de materiale polimerice, se cer sortimente cu proprietăți noi, îmbunătățite, în vederea utilizării în tehnicile de vârf precum industria de automobile, microelectronică, aviație, construcții aerospațiale, medicină, agricultură, cinematografie, etc.

Gradul de utilizare a materialelor plastice este determinat de optimizarea raportului dintre costuri și utilizare.

Extinderea utilizării materialelor polimerice este condiționată de:

- îmbunătățirea calității produselor existente;
- realizarea de materiale noi, compozite, prin combinarea produselor existente;
- obținerea de materiale noi cu proprietăți îmbunătățite.

În contextul în care în economia modernă se pune tot mai mult accentul pe insuficiența resurselor energetice și se investesc sume uriașe în domeniul cercetare-dezvoltare de noi tehnici energetice alternative și respectiv de reducere a consumului actual de energie, materialele polimerice reprezintă o sursă de economisire a energiei, parțial prin înlocuirea materialelor tradiționale grele și parțial prin reducerea consumului de energie în diferite faze de fabricație. Trebuie subliniat faptul că, deși crizele mondiale de materii prime și energie au frânat ritmul de dezvoltare a materialelor plastice, actuala conjunctură energetică mondială tinde să favorizeze în mod evident materialele plastice, produse cu consum de energie mai redus decât materialele tradiționale. Astfel, numai 3 - 4% din țițeiul extras este transformat în materiale plastice, iar conținutul energetic al polimerilor este inferior celui al metalelor [CLE 89].

O tendință importantă, care se va manifesta cu pregnanță în viitor, este înlocuirea materialelor tradiționale cu materialele plastice care dau produselor o calitate mai bună și o eficiență mai mare.

Un mare viitor îl au materialele compozite, tehnopolimerii armați cu fibre de sticlă, fibre carbon și fibre chimice speciale. Utilizarea materialelor compozite raportate la materialele tradiționale, pe lângă scăderea masivă a greutateii, le conferă și calități mecanice și termice superioare, iar plasticitatea permite a se realiza o înaltă productivitate și precizie în prelucrare [CLE 89].

## 1.6. Polimerii termoplastici

Diversificarea continuă a aplicațiilor materialelor plastice a avut drept consecință introducerea în prelucrarea acestora a aproape tuturor procedeele de prelucrare utilizate la alte materiale, procedee care utilizează energie mecanică, termică sau efectul combinat al acestora, făcând necesară cunoașterea principalelor

proprietăți ale polimerilor termoplastici.

Polimerii termoplastici se caracterizează prin [OLI 07]:

- termoplasticele sunt obținute din polimeri liniari cu ușoare ramificări;
- sunt polimerii cu cele mai lungi catene (lanțuri) esențiale, cu catene amestecate;
- dacă temperatura crește, amestecarea se diminuează și este facilitată punerea în forme;
- la temperaturi înalte, ele se topesc și trec în stare lichidă;
- alungirea în procente: 100-500%.

Morfologia polimerului reprezintă forma finală a structurii polimerului, incluzând cristalizarea, ramificația, greutatea moleculară, încrucișarea legăturilor etc. Proprietățile termoplastice sunt puternic influențate de morfologia lor.

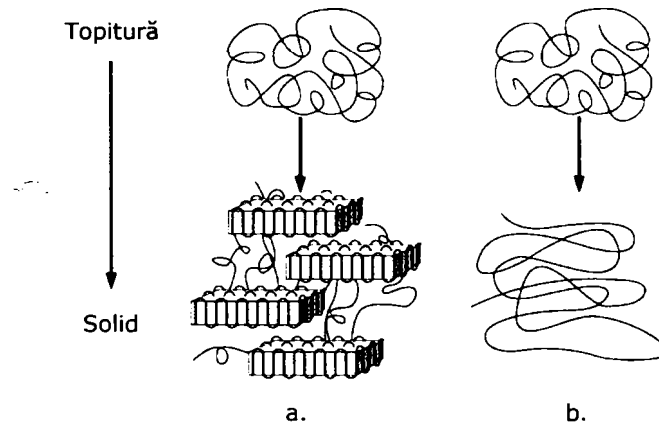
### 1.6.1. Stările fizice ale materialelor polimerice

Substanțele se prezintă în natură în 3 stări de agregare: solidă, lichidă, gazoasă. Compușii macromoleculari se găsesc doar în 2 stări de agregare: solidă și lichidă. Starea gazoasă nu există în acest caz, deoarece un polimer adus la temperaturi ridicate se va descompune înainte de a se evapora [ICL 04].

Pentru caracterizarea proprietăților compușilor macromoleculari, starea de agregare este neconcludentă și de aceea se definește starea de fază, care în sens termodinamic reprezintă o porțiune dintr-un sistem, omogenă din punct de vedere al compoziției chimice și proprietăților, separată de restul sistemului prin suprafețe nete [ȘER 02].

Un mare număr de polimeri poate să cristalizeze cu toate că procesul de cristalizare nu va fi niciodată complet (100%).

Din punct de vedere practic, este importantă legătura dintre structura polimerilor și proprietățile acestora în condițiile schimbărilor de temperatură și în special al modului cum variază comportamentul acestora la temperatura ambiantă și la temperatura de utilizare în majoritatea aplicațiilor [ICL 04].



**Figura 1.10.** Reprezentarea schematică a structurii moleculare a polimerilor în ambele stări - topitură și solidă: a) semicristalină; b) amorfă [Cal 07]

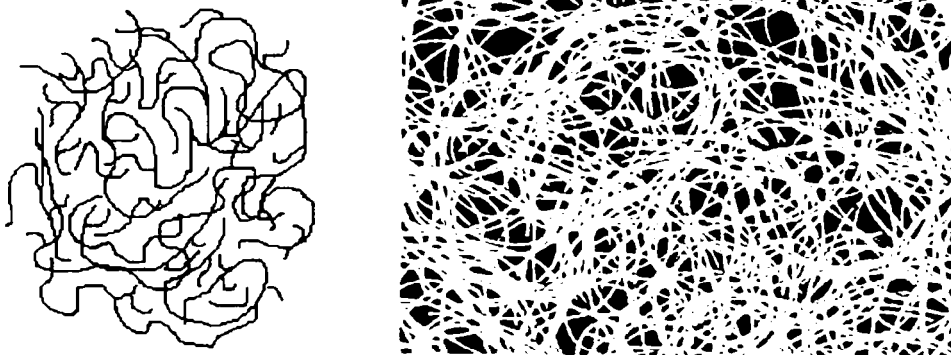
Polimerii pot să fie cristalini sau amorfi. Termoplasticele sunt de obicei semicristaline adică, o combinație între regiuni solide și amorfe. Se deosebesc astfel 2 stări de fază ale polimerilor [ȘER 02] [ICL 04]:

- amorfă;
- semicristalină.

O comparație redată schematic între polimerii semicristalini și ai amorfii, în ambele stări fizice (stare de topitură și stare solidă) este prezentată în figura 1.10.

### 1.6.1.1. Polimeri amorfii

Starea de fază amorfă (polimer amorf) se caracterizează din punct de vedere structural printr-un aranjament dezordonat al macromoleculor (figura 1.11).



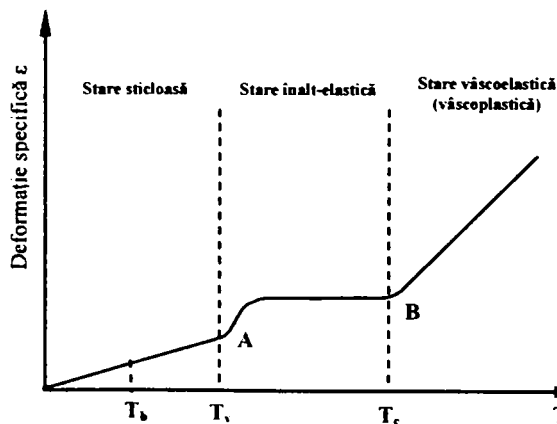
**Figura 1.11.** Structura amorfă a macromoleculor de polimer [USC 01] [OLI 08]

Polimerii amorfii se caracterizează prin aceea că sunt mai ușori, au puncte de topire mai joase și sunt mai penetrabile cu solvenți decât cei cristalini [USC 01].

Polimerii amorfii se prezintă în 3 stări fizice [ȘER 02]:

- vâscoelastică;
- înalt elastică;
- vitroasă (sticloasă).

Cele 3 stări fizice ale polimerilor amorfii, precum și temperaturile caracteristice acestor stări sunt evidențiate schematic în figura 1.12.



**Figura 1.12.** Diagrama de stare dinamică a polimerilor amorfii

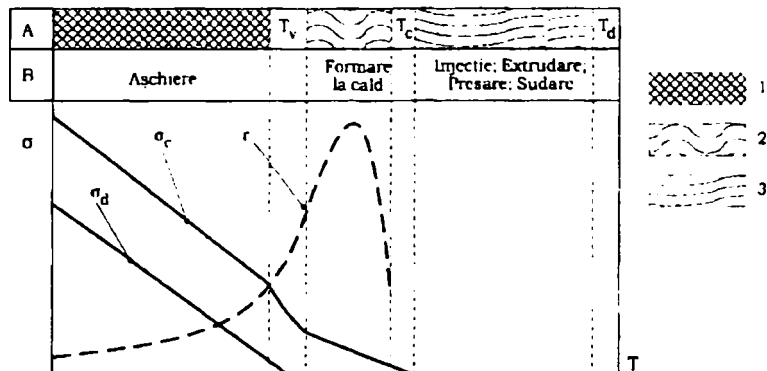
Temperaturile caracteristice stărilor fizice ale unui polimer amorf sunt:

- $T_b$  – temperatura de fragilizare – temperatura minimă până la care materialul nu este casant;
- $T_v$  – temperatura de vitrifiere;
- $T_c$  – temperatura de curgere (de topire);
- $T_d$  – temperatura de degradare termică.

Figura prezentată descrie dependența stării fizice a polimerilor amorfi de temperatură (A) cu fazele aferente:

- 1 - solidă (sticloasă);
- 2 - termoelastică (înalt elastică);
- 3 - faza termoplastică.

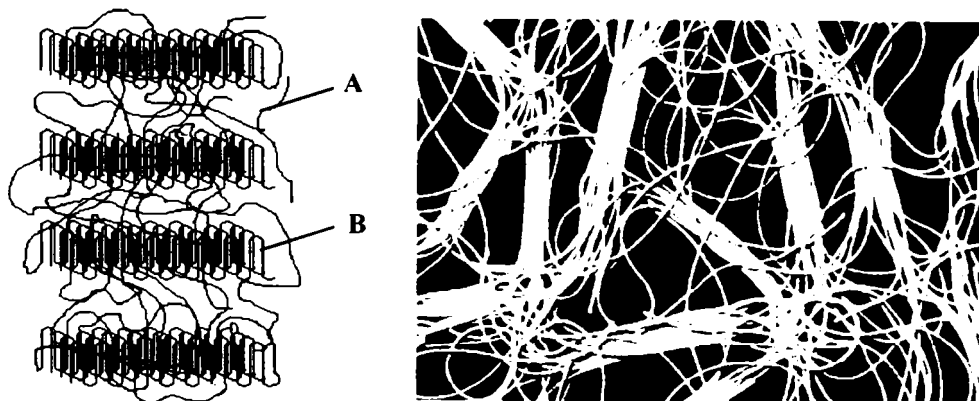
De asemenea, în figura 1.13 sunt prezentate și procedeele de prelucrare (B) la care se pretează materialele polimerice și respectiv limita de curgere ( $\sigma_c$ ), rezistența de durată ( $\sigma_d$ ) și alungirea specifică ( $\epsilon$ ) a unui polimer.



**Figura 1.13.** Temperaturile caracteristice stărilor fizice ale unui polimer amorf

### 1.6.1.2. Polimeri semicristalini

Polimerii semicristalini (figura 1.14) sunt materiale bifazice constituite dintr-un domeniu amorf și un domeniu cristalin ale căror proprietăți se suprapun [ȘER 02].

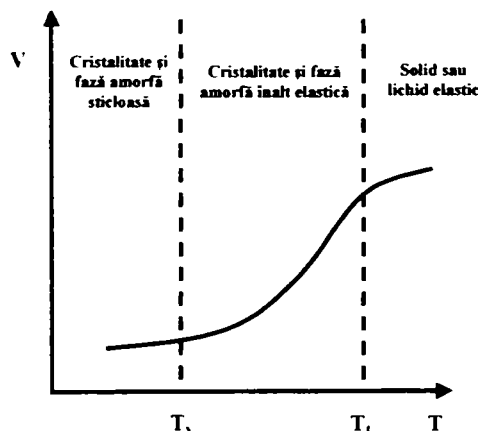


**Figura 1.14.** Structura semicristalină a macromoleculor de polimer: **A** - zonă neorientată (amorfă); **B** - zonă orientată (cristalină) [USC 01] [OLI 08]

Semicristalinitatea este o proprietate de dorit pentru majoritatea materialelor plastice deoarece combină rezistența polimerilor cristalini cu flexibilitatea celor amorfii [USC 01].

Dependența de temperatură a volumului specific al polimerilor semicristalini este evidențiată în figura 1.15 [ȘER 02]. Temperaturile ce caracterizează acești polimeri sunt:

- $T_v$  – temperatura de vitrifiere (înghețare);
- $T_i$  – temperatura de topire.



**Figura 1.15.** Dependența de temperatură a volumului specific al unui polimer semicristalin

Câteva caracteristici ale polimerilor termoplastici semicristalini sunt prezentate în tabelul 1.7 [ABD 98].

**Tabelul 1.7.** Câteva caracteristici ale materialelor termoplastice semicristaline [ABD 98] [NIC 77]

Polimer	Densitatea (g/cm <sup>3</sup> )	$T_v$ (°C)	$T_i$ (°C)	Modulul izotrop (GPa)	Modulul de cristalizare (GPa)
HDPE	0,95	-120	130	0,4-2	300
PP	0,9	-18	165	1-2	60
PET	1,39	70	255	3,2	108
PA-6	1,13	50	220	2,8	160
PA-11	1,05	50	180	1,8	160
PEEK	1,32	150	335	3,6	60
PVC	1,7	70-80	190		

**Tabelul 1.8.** Procentul de cristalinitate a principalelor materiale termoplastice semicristaline [ȘER 02]

Materialul termoplastic	Simbol	Procent de cristalinitate
Poliamidă 6	PA 6	40%
Poliamidă 66	PA66	70%
Poliacetal	POM	90%
Polietilentereftalat	PET	50%
Polibutilentereftalat	PBT	50%
Politetrafluoretilenă	PTFE	95%
Polifenilensulfură	PPS	50%



Poliarilamida	PAA	30%
Polietilenă de joasă densitate	LDPE	65%
Polietilenă de înaltă densitate	HDPE	80%
Polipropilenă	PP	60%
Polieteretercetona	PEEK	35%
Polimer cu cristale lichide	LCP	99%

Proporția de zone cristaline raportate la zonele amorfă determină procentul de cristalinitate a polimerului. Valorile acestui coeficient pentru diferite materiale termoplastice sunt prezentate în tabelul 1.8, iar în tabelul 1.9 pot fi urmărite o serie de materiale amorfă și cristaline [ȘER 02].

**Tabelul 1.9.** Materiale termoplastice amorfă și semicristaline [ȘER 02]

<b>Materiale termoplastice amorfă (simboluri)</b>	<b>Materiale termoplastice semicristaline (simboluri)</b>
PS	PA
ABS	PET
PC	PBT
PMMA	POM
PPO	PTFE
PPE	PPS
PVC	PAA
PSU	LDPE
SAN	HDPE
PEI	LCP
	PEEK

În funcție de starea fizică a polimerului (amorfă sau cristalină), proprietățile materialelor termoplastice pot fi diferite, după cum se poate observa în tabelul 1.10.

**Tabelul 1.10.** Diferența de proprietăți dintre materialele termoplastice amorfă și cristaline [ȘER 02]

<b>Material termoplatic amorf</b>	<b>Material termoplatic semicristalin</b>
În general transparent	Opac
Topire vâscoasă	Topire liberă
Coeficient de frecare ridicat	Coeficient de frecare slab
Caracteristici mecanice slabe	Rezistență mecanică ridicată
Ornamentare ușoară	Ornamentare dificilă
Contractie mică	Contractie și postcontractie importantă
Rezistență slabă la agenți chimici	Rezistență bună la agenți chimici
Scad caracteristicile mecanice odată cu creșterea temperaturii	O bună menținere a caracteristicilor mecanice la creșterea temperaturii

Temperaturile de vitifiere (tranzitie sticloasă) și de curgere (topire) sunt parametri importanți în ceea ce privește aplicarea materialelor polimerice. Valorile acestor temperaturi definesc limitele de temperatură inferioară și superioară pentru numeroase aplicații, în special pentru polimerii semicristalini. Temperatura de tranziție sticloasă poate de asemenea să definească temperatura superioară de

utilizare a materialelor amorfe sticloase. De asemenea,  $T_v$  și  $T_c$  influențează fabricația și procedura de procesare pentru polimeri și compozite cu structură polimerică [CAL 01].

## 1.7. Tehnologii principale de procesare a materialelor polimerice

Materialele termoplastice sunt formate din macromolecule liniare capabile să devină mobile între ele prin ridicarea temperaturii lor (de exemplu: PE, PP, PS, PVC, PA, PMMA, ABS, SAN, etc.).

Funcție de modul general în care un material plastic sub formă de semifabricat trece sau contribuie numai la definirea unei piese se pot clasifica principalele grupe ale procedeelor de prelucrare a materialelor plastice [ICL 04]:

- Matrițarea – aplicabilă la formarea pieselor masive sau cave cu pereți subțiri printr-un proces ce presupune solidificarea materialului într-o cavitate închisă. Procesul de prelucrare este unul discontinuu.
- Extrudarea – aplicabilă pentru obținerea pieselor de tip profil, tub, peliculă prin curgerea dirijată a materialului prin spații tehnologice special create în extruder. Procesul este continuu de înaltă productivitate.
- Calandrarea – procedeu de formare continuă a peliculelor plăcilor de material termoplastic prin trecere progresivă între role de deformare.
- Termoformarea – procedeu asociat deformării materialelor plastice subțiri în matrițe cu elemente active rigide.
- Asamblarea – grupează o serie de operații ce utilizează încălzirea, presarea și lipirea pentru a realiza îmbinări demontabile și mai des nedemontabile.

Aceste procedee de prelucrare nu pot fi aplicate universal la prelucrarea tuturor grupelor de materiale plastice, deci nu toate materialele pot fi procesate în același fel și prin aceleași metode.

În tabelul 1.11 sunt prezentate posibilitățile de procesare pentru diferite materiale polimerice [TAN 01].

Dintre procedeele de prelucrare menționate mai sus cele mai răspândite în procesarea materialelor polimerice sunt extrudarea și matrițarea prin injecție.

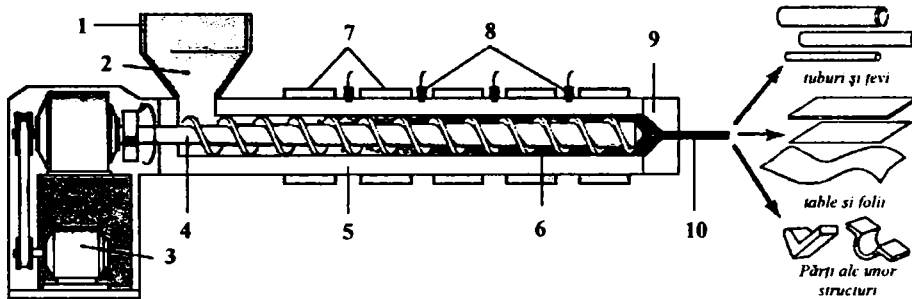
**Tabelul 1.11.** Posibilități de procesare a materialelor polimerice [TAN 01]

Procedeu Material	Extrudare	Injecție	Injecție- sufare	Formare rotativă	Termoformare
ABS	+	+	-	+	+
PA	+	+	-	+	-
PC	+	+	+	-	+
LDPE	+	+	+	+	-
HDPE	+	+	+	+	-
PMMA	+	+	-	-	+
POM	+	+	+	-	-
PP	+	+	+	-	+
PS	+	+	+	+	+
PVC	+	+	+	+	+
SAN	+	+	+	-	-

(+) – se poate prelucra; (-) – nu se poate prelucra

### 1.7.1. Extrudarea materialelor plastice

Extrudarea materialelor plastice este un proces continuu de formare, în sensul că polimerul capătă forme finite, variate, funcție de scopul urmărit: țevi, bare, teuri, folii etc. Utilajul specific acestei operații este mașina de extrudare.



**Figura 1.17.** Schema caracteristică a unui extruder [BRI 01] [CAL 07]

În figura 1.17 se prezintă schema caracteristică a unui extruder cu un singur melc format din:

- pâlnie – buncăr de alimentare (1);
- granule polimerice (2);
- motor de acționare (3);
- melc sau șurub melcat (4);
- cilindrul de plastifiere (5);
- topitură polimerică (6);
- elemente de încălzire (7);
- termocuple (8);
- filieră de extrudare (9);
- profil extrudat (10).

Din punct de vedere funcțional mașina de extrudare poate fi asimilată cu un sistem în sensul că se disting câteva zone funcționale și anume:

- zona de alimentare;
- zona de tranziție (topire);
- zona de dozare;
- zona de profilare.

În principiu, pentru funcționarea mașinii de extrudare sunt necesare trei elemente: cilindru, melc și fluidul vâscos care transmite cuplul motor [MIH 89].

În zona de alimentare are loc transportul granulelor solide de polimer, compactarea și comprimarea lor. Zona de alimentare se întinde de la intrarea granulelor în extruder când materialul este rece până la apariția primei picături de topitură. Din punct de vedere geometric această zonă are practic lungimea egală cu de două ori diametrul cilindrului. Creșterea temperaturii în lungul canalului se datorește surselor externe de căldură (prin transferul de la suprafața cilindrului care este încălzită electric) și surselor interne de căldură (generare de căldură datorită frecărilor dintre particule, între particule și suprafața cilindrului, între particule și suprafața melcului) [MIH 89].

Zona de tranziție se caracterizează prin aceea că două faze, una solidă formată din granule de polimer și una lichidă formată din topitură de polimer, coexistă.

În zona de dozare polimerul se găsește sub formă de topitură și extruderul funcționează ca o pompă cu melc.

Zona de profilare include capul de extrudare și celelalte elemente constructive care imprimă forma finită a produsului.

Prin acest procedeu se pot prelucra practic toate materialele termoplastice, dar numai o parte din ele se realizează sub formă de produse finite. Prin adaptarea unui echipament tehnologic adecvat se obține o gamă largă de produse. Cele mai importante sunt [ICL 04]:

- profile pline sau tubulare, rigide sau suple, calibrate sau necalibrate ce se pot prezenta rulate sau tăiate la dimensiuni prestabilite; profilele realizate pot fi și multicolore, compozite sau expandate;
- plăci sau folii continue compuse dintr-unul sau mai multe straturi suprapuse (coextrudare);
- pelicule și tuburi cu pereți subțiri prin extrudare - gonflare;
- învelișul din material termoplastic al firelor, cablurilor sau profilelor din materiale diferite;
- fibre sintetice pentru diferite procedee de țesere, acoperire sau asamblare;
- granule plastifiate și colorate necesare injectării, formându-se de la materialul pudră;
- amestecuri speciale sau reciclarea deșeurilor.

Formele finale ale materialelor polimerice după extrudare sunt dependente de forma filierei de extrudare. În figura 1.18 sunt prezentate câteva forme ale pieselor rezultate în urma extrudării prin diferite profile de filiere.



**Figura 1.18.** Formele materialelor polimerice după extrudare [CON 01]

Melcul este unul din componentele principalele ale unei mașini de extrudare prin care se definesc condițiile concrete de funcționare. Constructorii mașinilor de extrudare oferă un număr ridicat de variante constructive la care melcul poate fi diferit funcție de materialul extrudat și de filiera utilizată. De asemenea, în

vecinătatea filierei se pot intercala porțiuni cu sensul inversat al spiralei, cu proeminențe sau șicane de fragmentare a curgerii materialului, în scopul măririi efectului de amestecare a materialului plastifiat.

Funcțional, melcul cel mai simplu trebuie să prezinte trei zone caracteristice [ICL 04]:

- zonă de alimentare;
- zonă de compresie;
- zonă de pompare.

Un rol funcțional aparte în procesul extrudării îl prezintă filiera, care, pentru a fasa fluxul de material plastifiat și a-i imprima profilul dorit, trebuie să țină cont de o serie de particularități [ICL 04]:

- Materialul plastifiat la trecerea prin orificiile grilei este parțial frânat din mișcarea de rotație, pătrunzând într-un canal, a cărui secțiune se modifică progresiv spre forma finală.
- În general, profilul extrudat nu păstrează cu rigurozitate dimensiunile orificiilor filierei, existând diferențe pozitive sau negative.
- Relațiile dintre presiune, vâscozitate și viteza de curgere în canale de secțiune variabilă sunt foarte complexe în cazul materialelor plastice topite, diferite de cele cunoscute în cazul fluidelor newtoniene.
- Trecerea macromoleculilor prin filieră tinde să le alungească și să le orienteze mai ales în zonele unde diferența de viteză a straturilor este mai mare, adică în vecinătatea pereților. Cum obținerea unei viteze de curgere egale în secțiune este imposibilă, se impun corecții în orificiul filierei pentru ca profilul extrudat să capete forma dorită. Ca atare, înaintea ieșirii din filieră este de dorit ca materialul extrudat să traverseze o zonă de curgere paralelă. Lungimea recomandată a acestei zone este diferită, funcție de material, fiind de 8-10 ori grosimea peretelui extrudat în cazul materialelor mai puțin fluide (exemplu PVC rigid) și de 15-20 ori în cazul materialelor mai fluide (exemplu polietilena, poliamida).
- Variația secțiunii filierelor ce se montează pe același cilindru al mașinii de extrudare impune și corelări ale celorlalți parametri pentru a menține randamentul optim al mașinii.
- În general proiectarea exactă a unei filiere pentru un anumit profil este foarte dificilă, în practică fiind necesare încercări și ajustări succesive pentru a defini filiera exactă.

În tabelul 1.12 sunt redată câteva valori ale temperaturilor de extrudare pentru diferite materiale polimerice [NUJ 83].

**Tabelul 1.12.** Valorile temperaturilor în cilindrul extruderului (valori de lucru) [NUJ 83]

Materialul	Temperatura, °C
LDPE	150 – 185
HDPE	150 – 200
PVC tare (neplastifiat)	170 – 200
PVC moale (plastifiat)	150 – 185
PS	185 – 240
PP	175 – 300

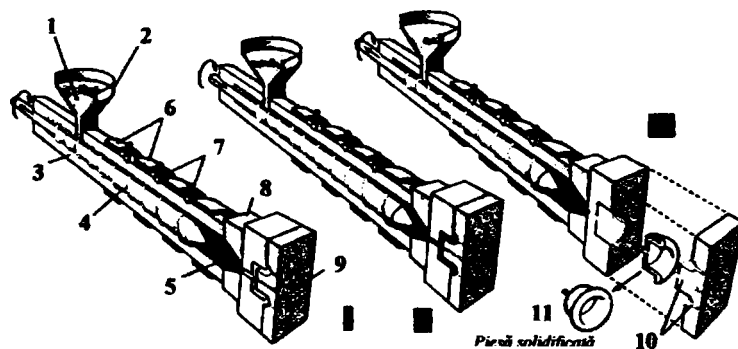
### 1.7.2. Injectarea materialelor plastice - matrițarea prin injectare

Matrițarea prin injectare reprezintă procedeul cel mai semnificativ de obținere a pieselor din materiale plastice. Acesta constă în încălzirea materialului plastic până ajunge în stare de topitură și forțarea acestuia să curgă, prin orificii înguste, într-o matriță cu cavitate (cuib) în care se produce răcirea și solidificarea materialului, urmând apoi ca piesa obținută să fie extrasă din matriță.

Este un procedeu de serie care permite realizarea unor piese din plastic de la câteva grame la câteva zeci de kilograme. Limita superioară este relativă și impusă doar de performanțele tehnice de moment ale utilajului [ICL 04].

Procesul de injectare a materialelor plastice este un fenomen ciclic care cuprinde mai multe operații ce nu sunt perfect delimitate. Întregul proces poate fi cuprins în următoarele trepte:

- plastifierea (I);
- umplerea matriței; } (II)
- compactarea;
- răcirea și demularea (III).

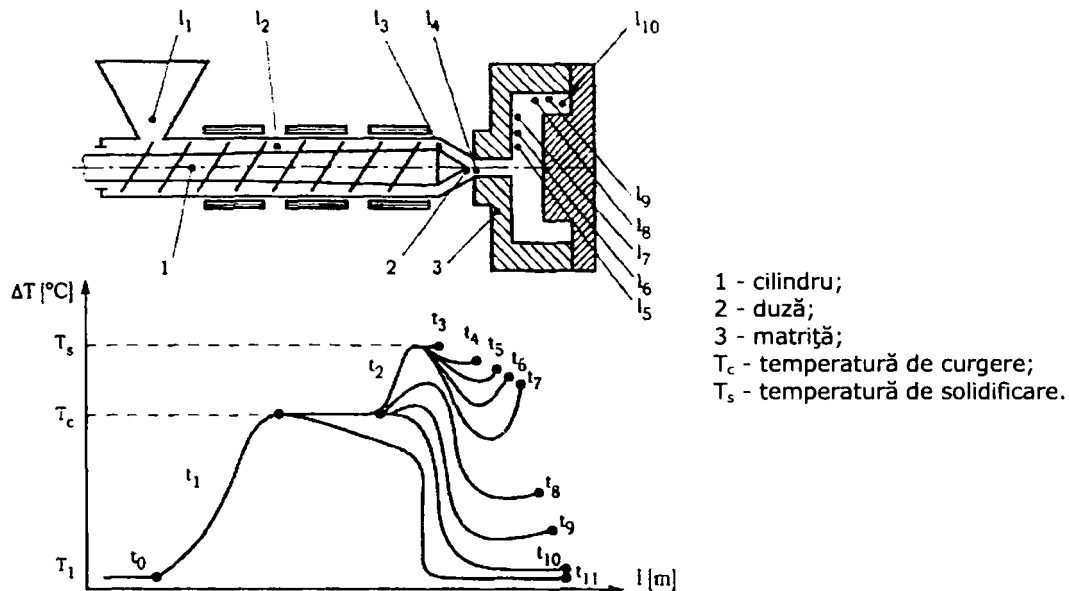


**Figura 1.19.** Schema de principiu a injectării: **I** - plastifierea materialului în cilindru de injectare; **II** - umplerea și solidificarea topiturii; **III** - deschiderea matriței și aruncarea reperului din matriță [BRI 01] [CAL 07]

Operația de injectare a unui reper poate fi urmărită în schema din figura 1.19. Materialul polimeric (virgin sau reciclat) sub formă de granule (1) se introduce în pâlnia de alimentare (2), de unde ajunge în cilindru de injectare (3). Materialul polimeric ajuns în cilindru de injectare este transportat de către melcul (4) spre capul cilindrului, unde se găsește duza de injectare (8). Mișcarea de rotație a melcului se realizează cu ajutorul unui sistem de angrenare. În timpul transportului granulele ajung în stare de topitură (5) ca urmare a frecărilor, precum și a încălzirii cilindrului de către corpurile de încălzire (6). Materialul polimeric topit este împins sub presiune în matrița de injectat (9), de către melcul (4), ca urmare a presiunii exercitate de sistemul de acționare. Controlul temperaturii în cilindru de injectare este realizat cu ajutorul unor termocuple (7).

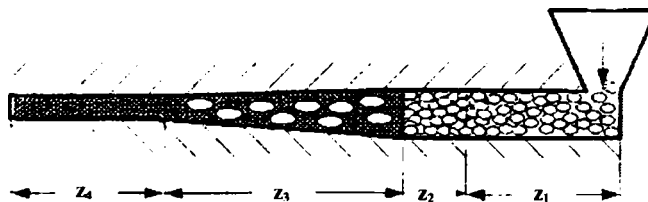
După solidificarea și răcirea materialului în matriță, platoul mobil al mașinii de injectat se îndepărtează de platoul fix, matrița se deschide și, ca urmare a acționării sistemului de aruncare al matriței (10), piesa injectată (11) este aruncată din matriță.

Traseul parcurs de materialul plastic începând cu etapa de alimentare și până la umplerea completă a matriței precum și temperaturile aferente în diferite puncte ale procesului sunt prezentate în figura 1.20. Cu cât temperatura materialului termoplastic este mai ridicată, cu atât acesta este mai fluid, matrița se umple mai ușor, iar timpii de injectare se reduc.



**Figura 1.20.** Temperaturile locale ale polimerilor pe parcursul injectării [ȘER 99]

Materialul plastic ce alimentează mașina de injectat la timpul  $t_0$  în punctul de coordonată  $l_1$ , are temperatura  $T_1$ . În interiorul mașinii, la timpul  $t_1$ , are loc încălzirea la temperatura  $T_c$  și plastifierea. Topitura, pe parcursul stadiului de umplere, curge în cilindru și duza mașinii, (coordonatele  $l_3 - l_4$ ), și se încălzește ca urmare a transformării energiei mecanice în căldură până la temperatura  $T_s$ . Temperatura și vâscozitatea topiturii în timpul umplerii matriței, (timpii  $t_1 - t_3$ ), se modifică puțin numai în interiorul matriței ( $l_4 - l_{10}$ ), pe când în mașina de injectat temperatura rămâne constantă ( $l_1 - l_4$ ). În stadiile de răcire, după umplerea matriței, (timpii  $t_3 - t_{11}$ ), temperatura materialului din matriță scade mult. Descreșterea temperaturii are loc și în canalele de curgere ( $l_3 - l_5$ ), iar la un timp de răcire foarte mare, (timp  $t_{11}$ ), poate avea loc chiar și în cilindru mașinii [ȘER 99].



**Figura 1.21.** Zonile canalului melcului în funcție de starea reologică a materialului:  
 $z_1 \dots z_4$  - zone reologice [ȘER 02]

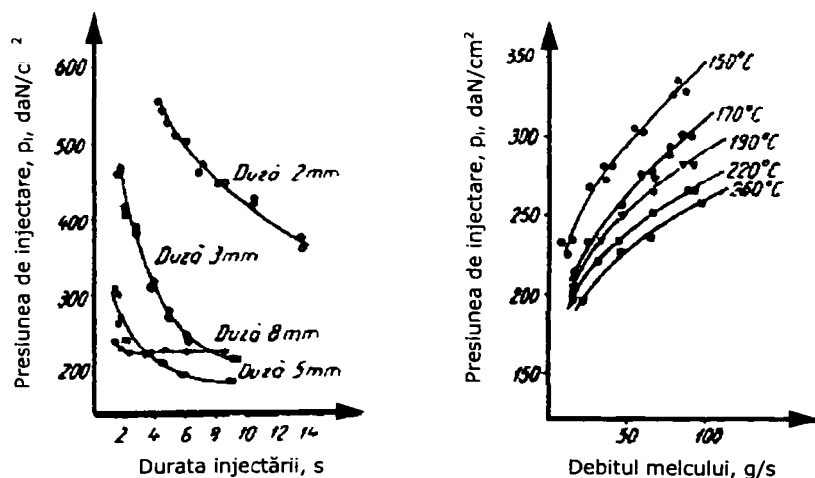
Modul cum variază starea fizică a materialului plastic de-a lungul canalului de injectare este prezentat în figura 1.21. Se prezintă zonele reologice ale polimerului pe măsura înaintării în canalul melcului [ȘER 99]:

- $z_1$  – materialul în stare de granule;
- $z_2$  – materialul plastic sub formă de particule se înmoaie superficial;
- $z_3$  – zona de tranziție a materialului de la faza solidă la faza de topitură, materialul fiind caracterizat de comportamentul vâscoplastic;
- $z_4$  – materialul se află în stare de topitură, iar comportarea reologică a topiturii este după caz: fluid vâscos newtonian, fluid vâscoelastic sau fluid vâscoplastic.

Piesele injectate se caracterizează, datorită problemelor de umplere a matriței, după raportul drum de curgere / grosime de perete. Cu cât umplerea matriței are loc într-un timp mai scurt, cu atât mai mare poate fi raportul dintre drumul de curgere și grosimea de perete. Pentru ca materialul termoplastic să poată curge prin canalele reduse ale rețelei și pentru o umplere mai rapidă a cuibului, se impune creșterea presiunii de injectare. Odată cu mărirea presiunii, vâscozitatea crește, viteza de deformare scade, iar curgerea materialului se face laminar, chiar la creșterea presiunii, datorită creșterii vâscozității care împiedică curgerea turbulentă [ȘER 02].

În figura 1.22 se prezintă diagrama de variație a presiunii de injectare funcție de [NUȚ 83]:

- durata injectării pentru materialul polistiren BASF (PS) la o temperatură de extrudare de  $190^{\circ}\text{C}$ , în funcție de timpul de avansare a melcului spre duză pe un drum de  $L = 83\text{mm}$ , utilizându-se duze cu diametre diferite: 2, 3, 5 și 8 mm (figura 1.22a);
- debitul melcului pentru materialul Lupolen BASF folosind un cilindru de injectare  $L/D = 0,875$ , duză de  $\varnothing = 8\text{mm}$ . Se observă că pentru debite crescânde sunt necesare presiuni de injecție crescânde, deci  $p_i$  crește cu debitul pentru aceeași temperatură de extrudare, nivelul presiunilor scăzând când crește temperatura (figura 1.22b).



**Figura 1.22.** Diagramele de variație ale presiunii funcție de: a) durata injectării; b) debitul melcului [NUȚ 83]



Procesul de umplere necesită numai 5% din durata ciclului. Umplerea matriței determină hotărâtor proprietățile reperului, astfel:

- influențează starea de orientare macromoleculară;
- influențează temperatura topiturii, mai ales în zonele îndepărtate de locul de injectare;
- indirect are influență asupra compactizării și asupra proprietăților reperului, deoarece efectul de compactare este cu atât mai puternic cu cât este mai scurt timpul de umplere a matriței.

## 1.8. Concluzii

În baza celor prezentate în acest capitol se pot trage următoarele concluzii:

- Materialele plastice reprezintă o categorie de produse a căror poziție competițională se consolidează permanent, datorită calităților excepționale, care le fac apte de a fi utilizate în condițiile cele mai exigente de calitate cerute de tehnica de vârf și producția de masă a bunurilor materiale.
- Gama de sortimente a materialelor plastice prelucrate este foarte mare continuând permanent să se diversifice, fiind utilizate în domenii și scopuri tot mai diverse.
- Materialele plastice, datorită proprietăților lor mecanice și electrice, în afară de faptul că au dus în multe domenii la înlocuirea metalelor, au permis și rezolvarea unor probleme de mare importanță în domenii de vârf ale tehnicii cum ar fi construcțiile aerospațiale, construcția automobilelor, electronică, electrotehnică, s.a.
- În prezent materialele plastice nu mai sunt considerate materiale de substituie, ci ele alcătuiesc o clasă proprie de materiale.
- Producția mondială de polimeri a crescut de la 27 de milioane tone pe an în 1975 la 200 milioane tone pe an și este într-o continuă creștere. Creșterea industriei de polimeri este datorată combinațiilor unice ale proprietăților polimerilor care include formare și fabricare ușoară, densitate scăzută, rezistență la coroziune, izolare electrică și termică și adesea rigiditate și rezistență pe unitate de greutate favorabile.
- Pentru producția de materiale plastice este necesar un consum mai redus de energie decât la metale și aceasta se traduce prin costuri de producție mai scăzute.
- Tendințele noi în domeniul tehnologiilor de prelucrare a materialelor plastice duc la micșorarea cheltuielilor pe unitatea de produs și la soluționarea problemelor de readucere în circuitul economic a materialelor plastice devenite deșeuri.
- În ciuda dezvoltării intensive a produselor din materiale plastice acestea nu pot înlocui în totalitate materialele tradiționale (oțel, ceramică, lemn). Majoritatea materialelor plastice prezintă rezistență mecanică relativ scăzută, sunt în majoritate nebiodegradabile, se aprind relativ ușor și prin ardere degajă gaze toxice.

# CAPITOLUL II

## CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE REOLOGICE ALE MATERIALELOR POLIMERICE [VLA, DEL, ACH]

### 2.1. Proprietăți reologice ale materialelor polimerice

#### 2.1.1. Generalități

Cercetarea fenomenologică a instabilității de curgere poate oferi posibilități de îmbunătățire a performanțelor procedeelor de prelucrare amintite. Dintre acestea, *extrudarea este acceptată ca procedeu clasic de definire a comportării reologice a materialelor polimerice*. Rezultatele experimentale pot fi extrapolate pentru celelalte procedee de punere în forma în care se solicită proprietățile reologice ale polimerilor.

Dintre proprietățile fizice ale materialelor polimerice continue, pentru aspectele ce urmează a fi cercetat în cadrul prezentei lucrări, prezintă interes deosebit proprietățile reologice ale materialelor polimerice termoplastice.

*Reologia* se ocupă cu studiul curgerii corpurilor sub acțiunea unor forțe și cu răspunsul corpurilor ca urmare a aplicării acelor forțe. O forță sau un sistem de forțe aplicat unui corp conduc la mișcarea acestuia, mișcare care poate consta în deformări și deplasări.

Un corp supus la o solicitare continuu crescătoare poate să manifeste proprietățile de elasticitate și vâscozitate succesiv, caz în care corpul se numește *plastic*. Sub acțiunea unei forțe corpul plastic va curge ca un fluid dacă forța depășește o valoare critică. Toate corpurile plastice, la solicitări mici, sunt elastice sau rigide, corespunzând stării solide, iar peste valoarea critică a solicitării apare curgerea vâscoasă, specifică stării lichide.

**Tabelul 2.1.** Stări reologice ale materiei amorfe

Solid ideal $\eta = 0$	Corpuri reale ( $E = 0, \eta = 0$ )						Fluid ideal $E = 0$
	Solide (vâscoelastice)			Fluide (elastovâscoase)			
Elastic	Stare vitroasă (sticloasă)	Stare înalt elastică de tip cauciuc	Stare solidă cu limită de curgere	Stare fluidă cu limită de curgere	Stare lichidă	Stare gazoasă	Vâscos
$E = 0$	→ tranziție vitroasă →		→ topire →		→ vaporizare →		$\eta = 0$
	← polimer →						

*Elasticitatea* este o proprietate specifică corpurilor solide, iar *vâscozitatea* este o proprietate a corpurilor fluide. Multe topituri de polimeri curg sub acțiunea

unei solicitări, întrucât posedă vâscozitate, iar după îndepărtarea solicitării o mică parte din deformație se recuperează posedând și atributul unui solid, elasticitate. Toate corpurile la care componenta elastică și componenta vâscoasă se manifestă simultan se numesc *vâscoelastice* sau *elastovâscoase*. Cele mai simple corpuri studiate de reologie sunt corpurile care posedă o singură proprietate, numite *corpuri cu comportare ideală*, *corpuri cu proprietăți unitare* sau *corpuri reologice particulare* [ȘER 02].

Concepția asupra stării reologice a materiei amorfe conduce la reprezentarea schematică din tabelul 2.1. [STA 09].

### 2.1.2. Corpuri cu comportare ideală

Cele mai simple corpuri studiate de reologie sunt corpurile care posedă o singură proprietate, numite *corpuri cu comportare ideală*, *corpuri cu proprietăți unitare* sau *corpuri reologice particulare*, ecuațiile reologice de stare fiind prezentate în continuare [Șer 02]:

- Legea lui Hooke:  $\tau = G \cdot \gamma$  - pentru corpul elastic ideal (figura 2.1.) (2.1)

- Legea lui Newton:  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$  - pentru fluidul pur vâscos (figura 2.2.) (2.2)

în care:  $\tau$  – efortul unitar de forfecare;

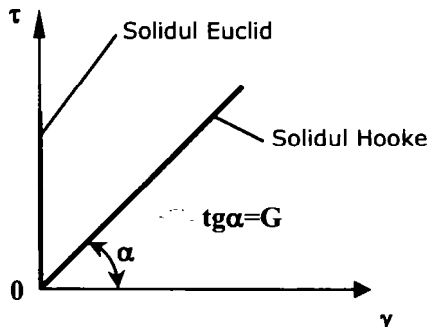
$\gamma$  – deformația sau alunecarea specifică;

$G$  – modulul de elasticitate transversală sau de alunecare;

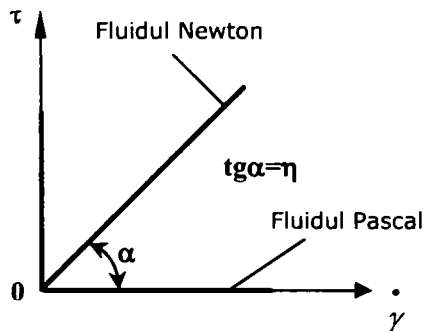
$\eta$  – coeficientul vâscozității de forfecare;

$\dot{\gamma}$  – viteza de forfecare (rata de curgere) sau reopanta.

$G$  și  $\eta$  – mărimile caracteristice manifestării de tip *elastic* și *vâscos*.



**Figura 2.1.** Reograma solidului lui Hooke [ȘER 02]



**Figura 2.2.** Reograma fluidului lui Newton [ȘER 02]

La aceste ecuații reologice se mai adaugă legea lui St. Venant pentru plasticul ideal [ȘER 02]. Corpul perfect plastic sau plasticul St. Venant posedă numai plasticitate, fiind necesar un efort limită  $\tau_0$  pentru deformare, care este nelimitată și ireversibilă, viteza de forfecare putând lua valori între 0 și infinit (figura 2.3.). Ecuația reologică a plasticului St. Venant este:

- Legea lui St. Venant:  $\tau = \tau_0$  - pentru plasticul ideal (2.3)

În care:  $\tau$  - efortul unitar de forfecare;  
 $\tau_0$  - efortul limită pentru deformare.

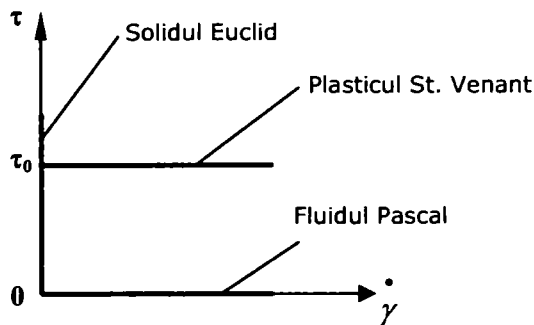


Figura 2.3. Reograma plasticului St. Venant; [ȘER 02]

### 2.1.3. Corpuri cu comportare reală, ne-newtoniană

În practica industrială se întâlnesc fluide care prezintă o comportare newtoniană. La aceste fluide, în condiții izoterme, dependența tensiune - viteză este neliniară, iar vâscozitatea nu este constantă, depinzând de parametrii solicitării. Aceste fluide se numesc *fluide nenewtoniene*.

Materialele polimerice sunt interesante în contextul curgerii, deoarece constantele de timp ale curgerii lor au aceeași ordine de magnitudine ca și timpii lor de procesare prin extrudare, injectare sau suflare. În timpi foarte scurți de procesare, polimerii se pot comporta ca solide, în timp ce la timpi lungi de procesare aceste materiale se pot comporta ca fluide. Această natură duală (fluid-solid) este numită *comportament vâscoelastic* [VLA 03].

Topiturile de polimer se comportă nenewtonian dacă masa lor moleculară depășește 5000. Creșterea masei molare determină o creștere a vâscozității, din cauză că energia de activare se mărește odată cu creșterea masei elementelor ce iau parte la curgere. Vâscozitatea topiturilor depinde și de temperatură, cu importanță mare asupra proprietăților tehnologice ale polimerului, deoarece sensibilitatea vâscozității la temperatură determină nu numai alegerea regimului de prelucrare ci și calitatea produselor obținute. Odată cu creșterea temperaturii apare posibilitatea trecerii macromoleculii dintr-o stare de echilibru în alta, datorită energiei de activare [ȘER 99].

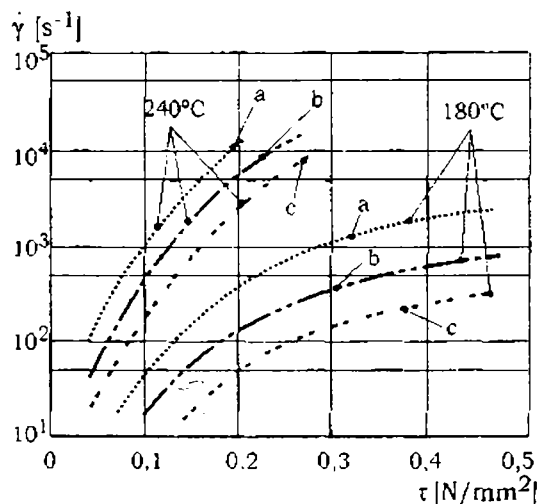
Măsurătorile privind curgerea topiturii sunt importante pentru industria polimerilor din mai multe motive. Primul și cel mai important este acela că ne informează dacă un material termoplastic poate fi extrudat, modelat sau redat sub forma unor obiecte de folosință, printr-un proces obișnuit de conversie plastică. În toate aceste procese, plasticul este mai întâi topit și apoi forțat să curgă printr-o filieră de extrudare sau matriță care îi vor da forma finală. Dacă curgerea materialului nu se potrivește exact procesului, atunci acesta nu va umple complet matrița sau se vor produce distorsiuni ale extrudatului sau părți neuniforme ale profilului, sau se vor forma părți care vor ceda la presiuni normale sau alte impacturi. În al doilea rând, curgerea unui material plastic mai este folosită ca un indicator, arătând dacă proprietățile finale ale produsului corespund cu acelea cerute de o anumită aplicație practică. O sporire a curgerii topiturii de la cea specificată poate indica o degradare a moleculelor de polimer, iar o descreștere poate reprezenta rezultatul reacției dintre molecule sau a înlănțuirii acestora. Erorile de compoziție pot determina schimbări de direcție. Aceste modificări moleculare pot

determina o pierdere din forța mecanică, din rezistența la impact sau din rezistența chimică, suficiente ca să afecteze proprietățile finale ale piesei finite. Una dintre metode constă în Testul MFR (Melt Flow Rate = Rata de Curgere a Topiturii) care uneori mai este citat ca Testul MFI (Melt Flow Index = Indicele Curgerii Topiturii). În cadrul acestui test este măsurată cantitatea de polimer extrudat în decurs de 10 minute în condiții standard de temperatură, geometrie și forță. Procedurile standard de testare stabilite pentru cea mai mare parte a polimerilor pot fi regăsite în standardele ASTM D 1238-95 sau ISO 1133. Acceptarea aproape universală a acestui test a apărut din faptul că acesta oferă indicii privind starea de calitate și în același timp este simplu, ușor de operat, rapid și, cel mai important, necostisitor. Datele dintr-un singur punct sunt introduse alături de datele despre timp rezultând grafice de control cu scopul de a stabili variabilitatea procesului și calitatea produsului rezultat [DEL 98].

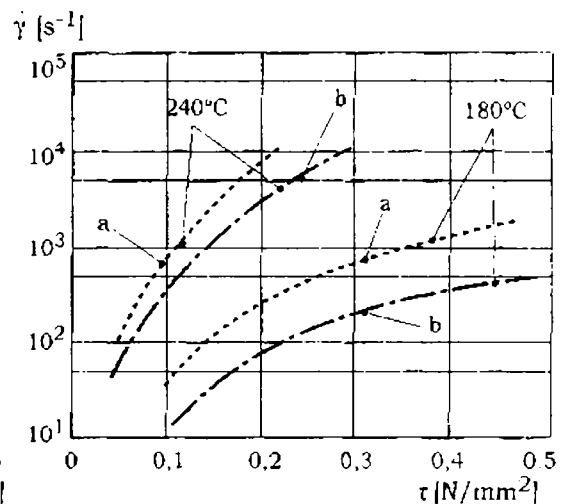
Pe lângă MFI se mai definește și un indice de topire MI (melt index) care dă următoarele informații despre comportamentul materialului [VLA 03]:

- un indice de topire mic înseamnă o greutate moleculară mare, și în consecință un polimer foarte vâcos;
- un indice de topire mare înseamnă o greutate moleculară mică, deci un polimer puțin vâcos.

Când indicele de topire este mai mic decât 1, atunci se poate spune că materialul are indice fracțional de topire. Astfel de materiale sunt folosite la extrudarea în strat subțire. Cele mai multe PE extrudate depășesc rareori  $MI = 12$ , iar la modelarea prin injectare MI este de obicei de ordinul 5-100.



**Figura 2.4.** Curbele de fluiditate  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  pentru polistiren standard la 180°C și 240°C (a - Hostyren N3000; b - Hostyren N4000; c - Hostyren N7000) [ȘER 02]



**Figura 2.5.** Curbele de fluiditate  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  pentru PS rezistent la șoc la 180°C și 240°C (a - Hostyren S3200; b - Hostyren S5400) [ȘER 02]

În procesele de prelucrare a termoplastelor au loc deformații însoțite de modificări structurale și de variația proprietăților reologice. Comportarea reologică a fluidelor reale și deci și a termoplastelor se prezintă în reograme care redau dependența dintre efortul unitar de forfecare și reopanta  $\dot{\gamma}$  (gradient de viteză).

Aceste reograme se obțin din experimente de forfecare simplă a fluidelor, iar curbele  $\gamma = f(\tau)$  se numesc și *curbe de fluiditate*. Pornind de la aceste curbe se poate calcula vâscozitatea în fiecare punct al curbei. Aceste curbe de fluiditate  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  pentru polistiren standard și polistiren rezistent la șoc înregistrate la 180°C și 240°C sunt prezentate în figurile 2.4. și 2.5. [ȘER 02].

Având în vedere cele prezentate mai sus se poate concluziona că vâscozitatea este cea mai importantă proprietate a curgerii. Ea reprezintă rezistența la forfecare, adică curgerea unor fâșii imaginare de fluid. Referindu-ne la figura 2.6., putem defini vâscozitatea ca fiind raportul dintre tensiunea de forfecare impusă (forța  $F$ , aplicată tangențial, împărțită la suprafața  $A$ ) și viteza de forfecare (viteza  $V$ , împărțită la înălțimea  $h$ ). Vâscozitatea apei este de  $10^{-3}$  Pa·s, în timp ce vâscozitatea celor mai mulți polimeri topiți în condiții de extrudare variază între  $10^2$  și  $10^5$  Pa·s [VLA 03].

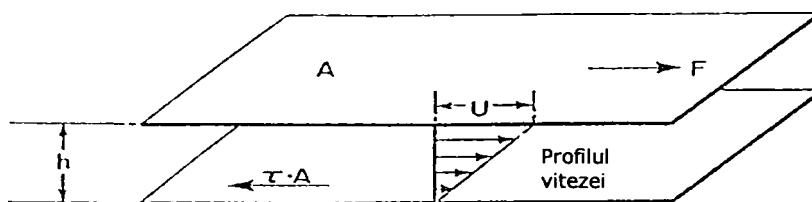
$$\eta = \frac{\text{tensiunea de forfecare}}{\text{viteza de forfecare}} = \frac{F/A}{V/h} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

în care:

$\eta$  - vâscozitatea [Pa·s] (Pascal·secunde);

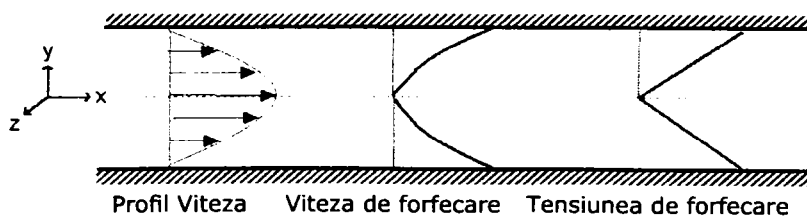
$\tau$  - tensiunea de forfecare [Pa] (N/m<sup>2</sup>);

$\dot{\gamma}$  - viteza de forfecare (deformare) [s<sup>-1</sup>].



**Figura 2.6.** Definierea vâscozității pentru cazul curgerii simple [VLA 03]

Pentru curgerea printr-un tub rotund sau printre două suprafețe plane, presiunea de curgere variază liniar de la zero de-a lungul axului central la o valoare maximă de-a lungul peretelui. Viteza de forfecare variază non-liniar, de la zero de-a lungul axului central la o valoare maximă de-a lungul peretelui. Profilul vitezei este cvasi-parabolic, cu un maximum în planul de simetrie și zero la perete, după cum se poate observa în figura 2.7., pentru curgerea printre două suprafețe plane [VLA 03].



**Figura 2.7.** Profilul de curgere al vitezei, viteza de forfecare și tensiunea de forfecare printre două suprafețe plane [VLA 03]

O proprietate remarcabilă a lichidelor polimerice este comportamentul lor de tip "subțiere la curgere" (cunoscut și sub numele de *comportament pseudo-plastic*). Dacă se mărește viteza de forfecare (adică polymerul este extrudat mai repede printr-o filieră), atunci vâscozitatea scade. Această reducere a vâscozității este datorată alinierii moleculare și desfacerii lanțurilor lungi ale polimerilor. Cu cât viteza de forfecare este mai mare, cu atât este mai ușor ca polimerii să fie forțați să curgă prin dispozitivele și filierele de procesare. Când presiunea de curgere la perete depășește 0,14 Mpa apar defecte de tip *piele de rechin* (*sharkskin*) la măsurarea în vâscozimetre capilare folosind polietilena de înaltă densitate (HDPE). La rate de curgere foarte mari, apare o instabilitate a curgerii cunoscută sub numele de *fracturare a topiturii sau curgere sacadată* (*stick-slip*) [VLA 03].

În figura 2.8. se prezintă graficul vâscozității (rezistența la curgere) raportată la viteza de forfecare (viteza de curgere) observate în cadrul câtorva procese de conversie a unor polimeri.

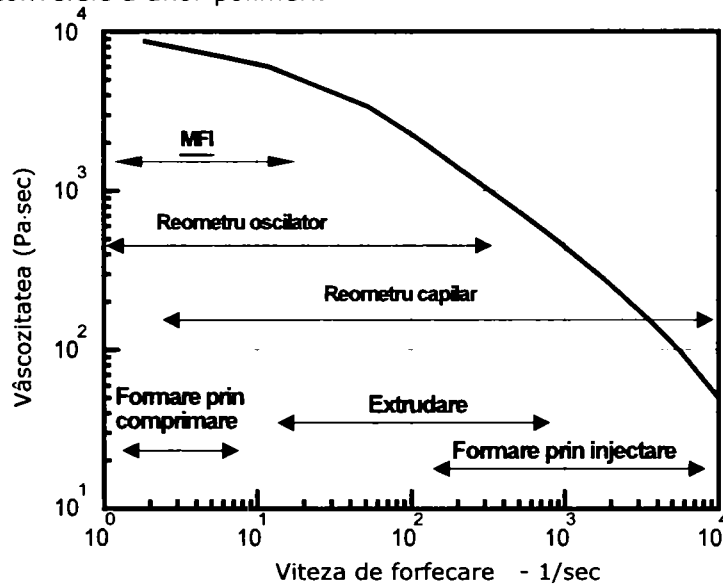


Figura 2.8. Reologia procesării polimerilor [DEL 98]

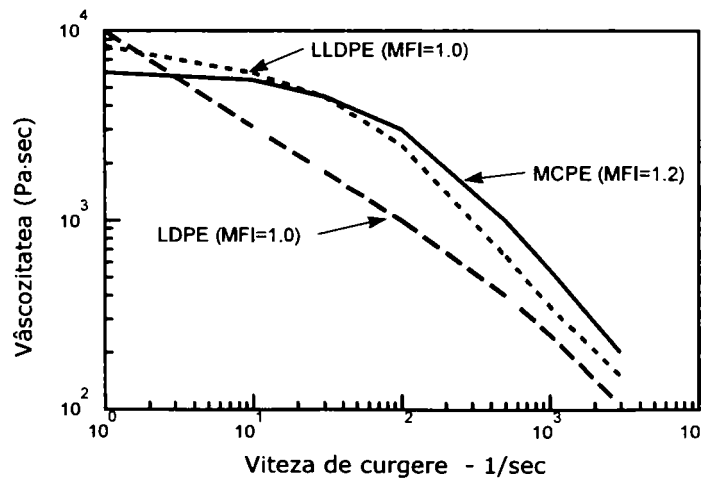


Figura 2.9. Comparații reologice pentru diferite materiale polimerice la 190°C [DEL 98]

Indicele de curgere a topiturii (MFI) poate să prevadă prin valoarea sa dacă polimerii cu structuri diferite vor necesita condiții similare de procesare. Astfel, studii care au luat în considerație trei polimeri: polietilenă de joasă densitate (LDPE), polietilenă de densitate lineară joasă (LLDPE) și polietilenă catalizată - metalocene (MCPE) sau „plastomer”, care au rate similare de curgere a topiturii, au fost efectuate (figura 2.9.). S-a putut observa din curbe că la rate mari de curgere, obținute prin modelarea prin injecție și extrudare, comportamentele de curgere a polimerilor care dictează parametrii de procesare, sunt foarte diferite. Temperatura la care s-a desfășurat experimentul este de 190°C [DEL 98].

## 2.2. Echipamente speciale de investigare a curgerii materialelor polimerice

Ca obiect important al reometriei îl constituie măsurarea funcțiilor de material cu ajutorul instrumentelor denumite reometre.

Curgerea unui fluid nenenewtonian este caracterizată complet de cele trei funcții de material  $\eta_a$ ,  $\psi_1$  (coeficientul primei diferențe a tensiunilor normale) și  $\psi_2$  (coeficientul celei de-a doua diferențe a tensiunilor normale), care sunt funcții de viteză de deformare. Când viteza de deformare tinde către zero, prima și a doua diferență a tensiunilor normale se anulează. Pentru fluidul newtonian, vâscozitatea aparentă  $\eta_a$  este constantă și  $\psi_1 = \psi_2 = 0$  pentru orice valoare a vitezei de deformare.

Reogoniometrele sunt definite ca reometre pentru măsurarea componentelor normale ale tensorului tensiunilor. Această definiție include reometrele capilare și cele similare de tip rotitor. Reometrele capilare se folosesc de regulă pentru studiul fluidelor vâscoase și topiturilor de polimeri la numere Reynolds mici [MIH 89].

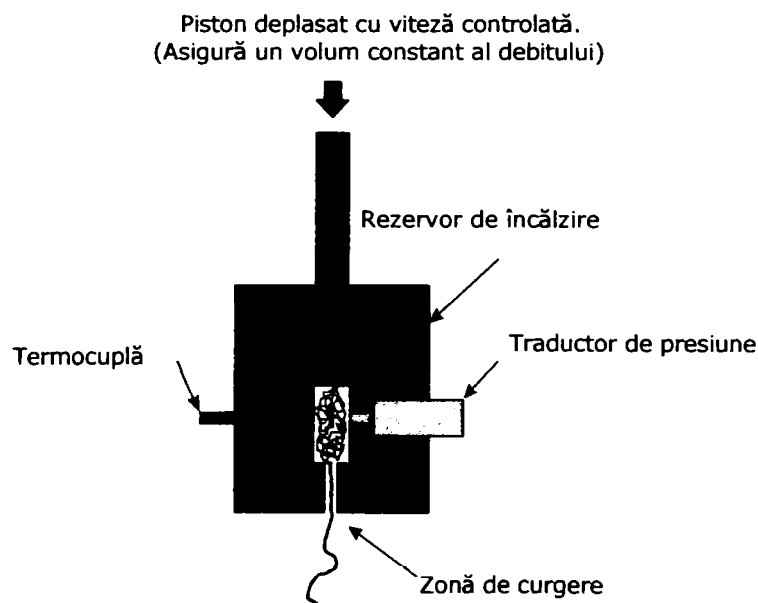
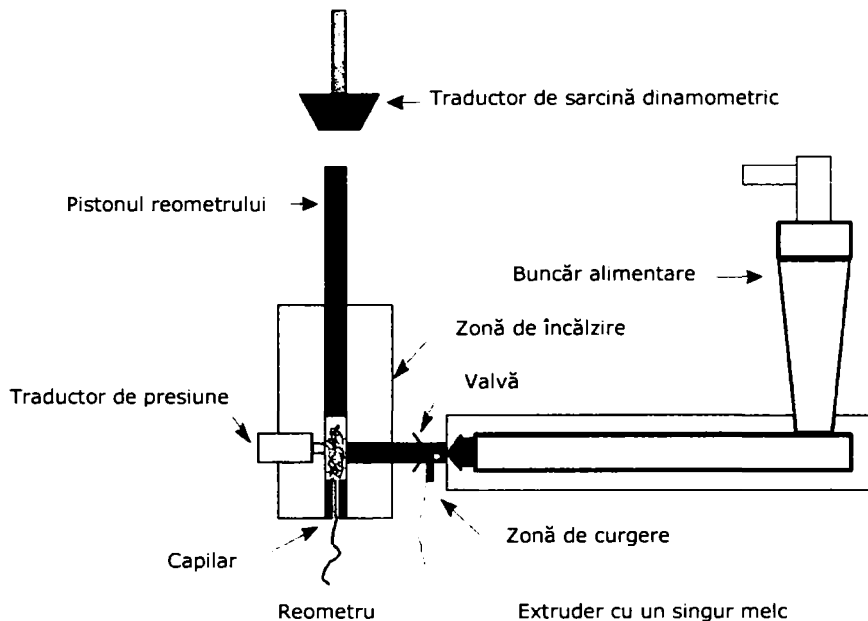


Figura 2.10. Reometru capilar [DEL 98]



Pentru determinarea procesabilității unui material se poate utiliza un reometru capilar caracterizat de raportul  $L/D$  și rezistența la curgere (vâscozitatea) calculată pe baza relației 2.4 (figura 2.10.). De regulă, în alcătuirea unui reometru intră un rezervor controlat termic și un piston care forțează polimerul topit să treacă printr-un capilar de dimensiuni fixe. Forța necesară pentru a produce curgerea (tensiunea de forfecare) și viteza de forfecare (deformare) sunt folosite apoi la calcularea vâscozității sau rezistenței la curgere.

În vederea unei noi abordări referitoare la controlul procesării, De Laney utilizează un sistem reometru capilar automat de laborator interfațat cu extruder cu un singur șurub (melc mic, numit "Rheo-Truder" (figura 2.11.).



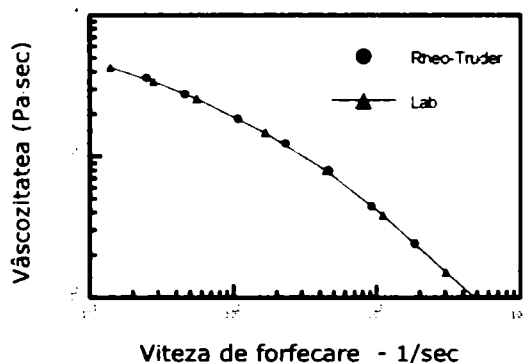
**Figura 2.11.** Reometru capilar automat [DEL 98]

Acest echipament utilizează un sistem pneumatic care folosește mostre sub formă de pudră sau de pelete, pe care le transferă spre extruder (rata de furnizare a mostrelor este stabilită cu ajutorul unui detector situat în gâtul extruderului). Extruderul se setează la temperatura de testare, apoi polimerul este topit și transportat în reometru. Polimerul intră în rezervorul reometrului și forțează pistonul situat deasupra până ce acesta lovește celula de încărcare (traductor de sarcină dinamic) și inițiază testul. Pe măsură ce pistonul este împins în jos, presiunea crește și va închide valva de verificare localizată între extruder și reometru, cu scopul de a preveni curgerea inversă a topiturii. Cu ajutorul unui program special privind rata curgerii, reometrul va realiza curba reologică specifică. La sfârșitul testului, deplasarea pistonului se va opri, iar scăderea de presiune va constitui un semnal care va determina reometrul să-și repună melcul de extrudare la poziția inițială de lucru. Presiunea scăzută din rezervor permite valvei de verificare să se deschidă și să lase să treacă topitura de polimer, care va împinge pistonul în sus, și astfel va începe un nou ciclu de testare. Durata totală a unui ciclu de testare a unui sistem depinde de [DEL 98]:

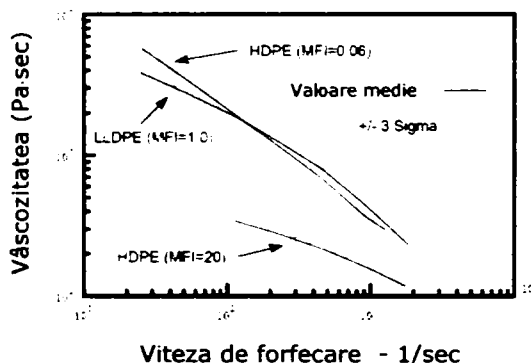
- timpul de transferare a peletelor prin sistem (secunde);

- timpul de acționare al extruderului (minute, în funcție de viteza melcului de extrudare);
- timpul de umplere a rezervorului (aproximativ 30 secunde);
- timpul de testare al reometrului (care depinde de numărul și magnitudinea ratelor de curgere folosite).

DeLaney a constatat în urma realizării a sute de teste cu Rheo-Truder-ul că acesta produce rezultate reproductibile care se află în excelentă sincronizare cu măsurătorile din laborator (figura 2.12.). De fapt, precizia măsurătorilor este chiar mai mare decât a celor din laborator. Figura 2.13. arată rezultatele obținute utilizând Rheo-Truder-ul pentru polimeri cu variații mari ale ratelor de curgere.



**Figura 2.12.** Comparație între variația vâscozității funcție de viteza de deformare [DEL 98]



**Figura 2.13.** Comparație între variația vâscozității funcție de viteza de deformare pentru diferiți polimeri [DEL 98]

### 2.3. Defectele principale apărute în timpul procesării topiturii materialelor polimerice

Pierderea calității în procesele de prelucrare a materialelor polimerice se poate manifesta printr-o gamă largă de defecte, majoritatea având la origine curgerea defectuoasă a materialului prelucrat. De la simpla alterare a aspectului suprafeței produsului (calandrare, extrudare, injectare) până la extinderea perturbării curgerii în volumul materialului, aceste defecte sunt strâns legate de comportarea reologică a topiturii de polimer pentru anumite combinații ale valorilor parametrilor de procesare (temperaturi, presiuni, viteze de curgere). Se poate spune că, pentru valori prescrise de temperatură și presiune, depășirea unei valori critice a vitezei de curgere declanșează o instabilitate a curgerii topiturii și, prin apariția defectelor asociate, pe lângă diminuarea calității produsului, se induce o limitare a productivității procedeele de punere în formă. Dintre aceste procedee, extrudarea este acceptată ca procedeu clasic de definire a comportării reologice a materialelor polimerice [STA 03].

Extrudarea polimerilor implică rate de forfecare de până la  $1000 \text{ s}^{-1}$ , iar măsurarea vâscozităților se realizează cu scopul de a determina comportamentul la curgere/forfecare. Pentru analiza anumitor procese sunt necesare cunoștințe despre vâscozitatea de elongație și/sau rezistența la topire. Nivelul de elasticitate este indicat de diferențele de presiune normală și de măsurătorile privind modulul dinamic ( $G'$  și  $G''$ ) [VLA 98].

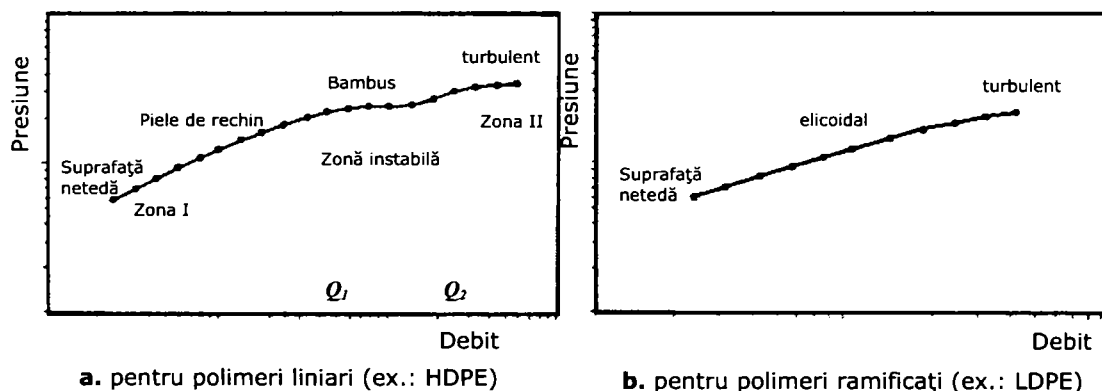
În vederea îmbunătățirii instabilității de curgere s-a acceptat extrudarea ca fiind procedeu de definire a comportării reologice a materialelor polimerice,

rezultatele experimentale obținute putându-se extrapola și pentru celelalte procedee de punere în formă.

O primă clasificare a defectelor se bazează pe observarea morfologiei produsului extrudării și definește două clase de defecte [STA 03]:

- Defecte de suprafață sau superficiale - riduri perpendiculare la direcția de curgere. Funcție de gradul de manifestare (frecvența și adâncimea acestor riduri), efectul poate fi 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 de curgere în volumul topiturii. Dintre acestea, cel mai frecvent întâlnit este "*defectul (curgerea) helicoidal(ă)*" iar ca formă extremă de manifestare, "*curgerea haotică*" sau *turbulentă*.

Întotdeauna un defect de volum este precedat de un defect de suprafață, de mai mică importanță, dar este dificil și lipsit de interes aplicativ a stabili condițiile trecerii de la o categorie la cealaltă, 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 2.14.** Principalele defecte de extrudare și poziționarea zonelor de manifestare pe curbele de curgere [STA 03]

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 [STA 03]:

- Defecte tip HDPE (polietilenă de înaltă densitate). Se manifestă la extrudarea polimerilor liniari: HDPE, LLDPE, siliconi, polibutadiene, poliisoprene. Succesiunea de apariție a defectelor este: piele de rechin, curgere sacadată (cunoscută sub denumirile: "*defect de tip bușon*", "*defect bambus*", defect "*plug flow*" sau defect "*stick-slip*"), curgere haotică (turbulentă). Curbele de curgere debit–presiune sunt caracterizate de o discontinuitate evidentă manifestată prin existența a două ramuri stabile, zona I și II, separate de o zonă intermediară, instabilă, (figura 2.14.a);
- Defecte tip LDPE (polietilenă de joasă densitate). Se manifestă în cazul polimerilor ramificați sau cu o puternică încărcare sterică: LDPE, PS, (PP) pentru care apariția defectelor respectă următoarea succesiune:

pierderea luciului, defect helicoidal, curgere turbulentă, curbele de curgere (presiune – debit) fiind continuu crescătoare, figura 2.14.b.

Curgerea fluidelor nenewtoniene prin dispozitive cu secțiune inelară, plăci paralele, orificii circulare are mare importanță pentru procedeul de prelucrare. În cazul topiturilor din material termoplastice poate fi întâlnită [ȘER 99]:

- curgerea laminară (zona I);
- curgerea turbulentă (zona II);
- curgere în domeniul de tranziție de la laminar la turbulent.

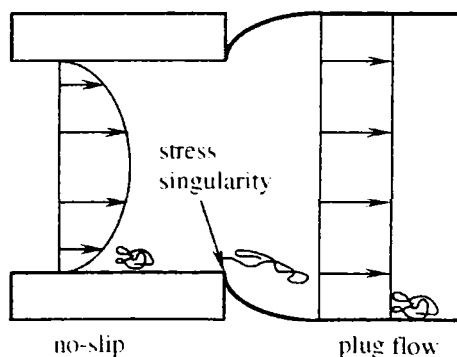
Apariția curgerii turbulente sau a curgerii nestaționare, se datorește faptului că oscilațiile elastice ale mediului devin atât de intense încât nu mai pot fi amortizate de frecarea vâscoasă. Perturbația curgerii care duce la apariția curgerii nestaționare poate fi provocată de [ȘER 02]:

- perturbația profilului de viteze la intrarea într-o capilară sau ajutoraj;
- lungimea capilare sau ajutorajului;
- natura și rugozitatea suprafeței capilare sau ajutorajului.

Apariția defectelor de suprafață la emergența extrudatului de topituri polimerice dintr-o filieră de extrudare (descrisă ca *shark skin* – piele de rechin, fracturare a topiturii, neregularități masive ale suprafeței) reprezintă o problemă industrială importantă. Apariția distorsiunilor extrudatului se produce la o limită superioară a ratei de procesare în procesul de extrudare de bază a polimerilor și suspensiilor polimerice. Această problemă industrială a primit o atenție deosebită din partea mediului academic și industrial (Benbow and Lamb, 1963; Petrie and Denn, 1976; Larson, 1992; Denn, 2001; Kalyon și Gevgilili, 2003; Miller, 2004).

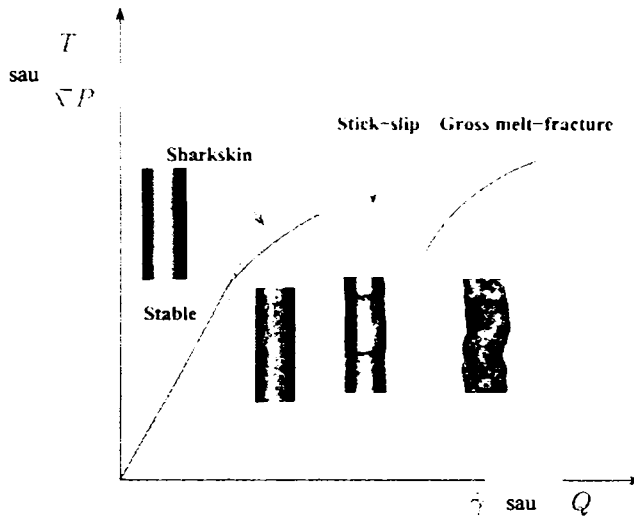
Numeroase topituri de polimeri, în special polimeri liniari, manifestă alunecare la perete (Awati et al., 2000; Hatzikiriakos and Dealy, 1991; Gevgilili and Kalyon, 2001; Rielly and Price, 1961; Kalika and Denn, 1987; Ramamurthy, 1986; Chen et al., 1993; Migler et al., 1993; Mi.instedt et al., 2000) și alunecarea la perete este considerată a fi unul din factorii majori care poate afecta formarea distorsiunii extrudatului [KAL 04].

Cauza fizică de bază a acestei instabilități de curgere elastică este încă dezbătută în mare măsură în literatură. Există totuși un consens în literatură cum că instabilitatea este rezultatul tensiunilor singulare, "*stress singularity*" dezvoltate la ieșirea din filiera de extrudare (Arda and Mackley, 2005). Fluidul este accelerat de-a lungul suprafeței filierei cu o viteză de la "0" (fără alunecare la perete, "*no-slip*") la cea de curgere în bloc ("*plug flow*") în partea de ieșire, capilarul producând tensiuni enorme la ieșirea din filieră (figura 2.15.) [MIL 06].

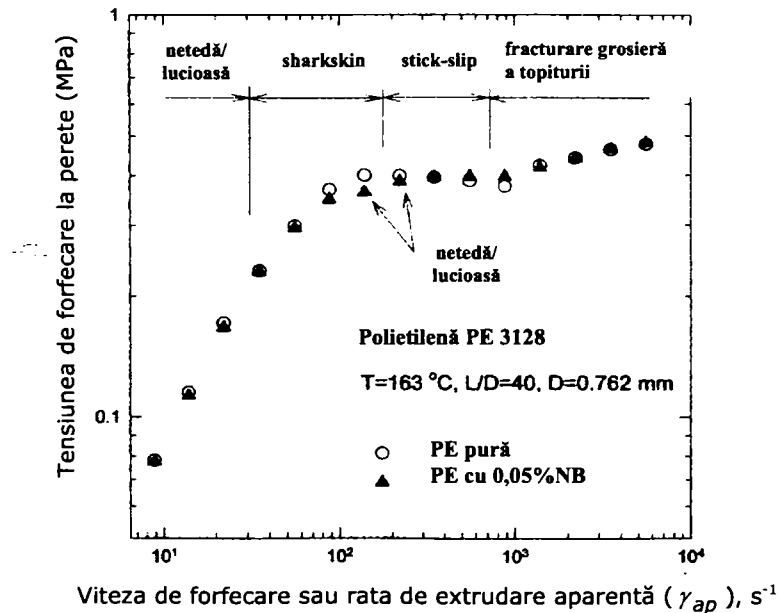


**Figura 2.15.** Diagrama schematizată a geometriei de ieșire a unei filiere capilare [MIL 06]

Instabilitatea curgerii ce se manifestă în cadrul proceselor de extrudare poate fi înțeleasă mai bine urmărind variația curbei de curgere aparentă pentru diferite regimuri de curgere. În figura 2.16. se prezintă curba de curgere aparentă caracteristică pentru materialul polietilenă liniară (LPE) folosind un reometru capilar. Este o funcție logaritmică a tensiunii de forfecare la perete raportată la viteza aparentă de forfecare la perete, sau curba căderii de presiune ( $\nabla P$ ) versus debit ( $Q$  - cantitate de material trecut prin echipamentul folosit) [ACH 02].



**Figura 2.16.** Curba de curgere caracteristică pentru materialul LPE; regiunea de instabilitate într-un capilar [ACH 02]



**Figura 2.17.** Curbele de curgere pentru materialul PE [ACH 02]

De asemenea, în sprijinul celor enunțate vine și figura 2.17. în care se evidențiază curbele de curgere pentru materialul m-LLDPE pură și cu NB (nitrit de bor) obținută folosind un reometru capilar cu diametrul filierei  $D = 0,762\text{mm}$ , raportul  $L/D = 40$  la  $200\text{ s}^{-1}$  [ACH 02].

### 2.3.1. Defectul de tip "piele de rechin" (*sharkskin*)

Instabilitatea de tip "*sharkskin*" a fost atribuită de mulți cercetători unei mici abateri de la condițiile de nealunecare a polimerului la perete, care pot fi însoțite de o schimbare a suprafeței extrudatului.

Se referă la fenomenul prin care suprafața unui extrudat își pierde netezimea și luciul, fapt pentru care acesta mai este cunoscut și sub termenul de "*piele de rechin*".

De obicei suprafața afectată prezintă unde și creste ce se repetă, perpendicularare pe direcția de curgere. Acestea apar la un nivel critic al presiunii de cel puțin  $0,14\text{ MPa}$  ( $21\text{ psi}$ ) la cei mai comuni polimeri extrudați prin filiere capilare. Prin adăugarea de aditivi lubrifianți, facilitanți de procesare sau pelicule speciale de acoperire a filierelor, efectul „piele de rechin” poate fi evitat până la valori mari ale presiunii de forfecare, de până la  $0,5\text{ MPa}$ .

Cel mai proeminent punct de vedere este reprezentat de faptul ca acest defect își are originile în vecinătatea orificiului de ieșire din filieră și se datorează fenomenelor de alunecare la perete (*stick-slip*). O presiune critică de forfecare la ieșirea din filieră alături de o accelerație critică va determina apariția de rupturi la suprafața extrudatului [VLA 03].

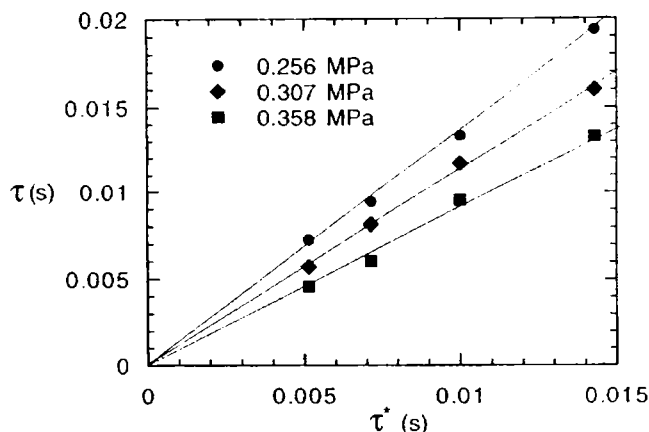
Bazată pe inspecția calitativă, "*pielea de rechin - sharkskin*" corespunde unei rugozități a suprafeței de aproximativ  $10\mu\text{m}$ . În cazul materialului LLDPE (polietilena liniară de joasă densitate), dacă viteza de forfecare este păstrată constantă se observă că amplitudinea scade treptat pe măsură ce temperatura crește. În figura 2.18. se poate observa scăderea rugozității suprafeței extrudatului de la  $A=90\mu\text{m}$  (2.18.a) la  $25\mu\text{m}$  (2.18.b) și la  $9\mu\text{m}$  (2.18.c) în timp ce temperatura pereților filierei capilare crește de la  $T=130^\circ\text{C}$  și la  $150^\circ\text{C}$  la  $170^\circ\text{C}$  la viteză de forfecare constantă de  $30\text{ s}^{-1}$  și temperatura masei polimerice  $T=140^\circ\text{C}$  [MIL 04].



**Figura 2.18.** Profilul extrudatului de LLDPE la viteze de forfecare și temperaturi ale mediului constante și temperaturi ale filierei crescătoare [MIL 04]

În urma studiilor realizate de Wang S.Q. [WAN 96] pe materialul LLDPE, acesta a sugerat pentru prima dată că dinamica apariției "*sharkskin*" poate fi asociată instabilității moleculare ce corespunde unei oscilații a lanțurilor (catenelor) absorbite în regiunea de ieșire a filierei dintre starea șerpuită și cea de întindere. El a mai observat că  $\tau$  (periodicitatea apariției "*sharkskin*") se produce la aceeași mărime ca  $\tau^*$  (timp de relaxare molecular), dar și faptul că aceste două mărimi depind de temperatura  $T$  în același model WLF (Williams–Landel–Ferry) așa cum se

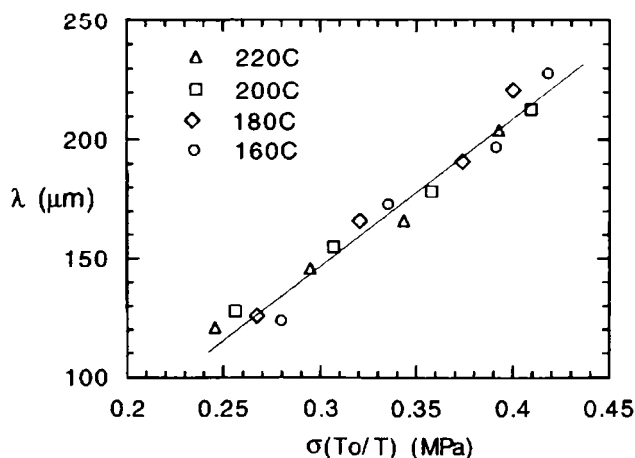
arată în figura 2.19. Relația liniară demonstrată dintre  $\tau$  și  $\tau^*$  acceptă ideea că formarea "sharkskin" se datorează instabilității moleculare a stării de tensiune raportată la starea instabilă a structurii totale a lanțurilor la regiunea înalt solicitată de ieșirea din filieră unde lanțurile absorbite oscilează între stările *încurcate* și cele *descurcate*.



**Figura 2.19.** Scara timpului  $\tau$  corespunzătoare "sharkskin" raportată la timpul de relaxare a lanțurilor  $\tau^*$  pentru Dowlex 2045 LLDPE la trei valori de solicitare. Timpul, T, reprezintă variabila implicită variind între 160, 180, 200 și 220°C [WAN 96]

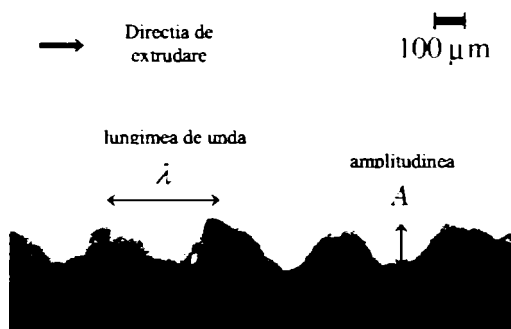
De asemenea, Wang prezintă în figura 2.20. dependența universală a lungimii unei "sharkskin"  $\lambda$  cu solicitarea redusă  $\sigma (T_0/T)$  la toate temperaturile, indicând că dinamica apariției "sharkskin" poate fi omniprezent înțeleasă în termenii ecuației 2.5 și a proceselor de relaxare moleculară a lanțurilor. Ridicând graficul  $\lambda$  funcție de  $\sigma (T_0/T)$  pentru patru valori ale temperaturii (160, 180, 200 și 220°C) și utilizând o filieră cu raportul  $L/D=15$ ;  $D=1,04\text{mm}$  și unghi de intrare  $60^\circ$ , se obține curba principală de caracterizare a sharkskin pentru materialul Dowlex 2045 LLDPE.

$$\lambda = V \cdot \tau = (D/8) \cdot (D/D')^2 \cdot (\gamma \cdot \tau) \quad (2.5)$$

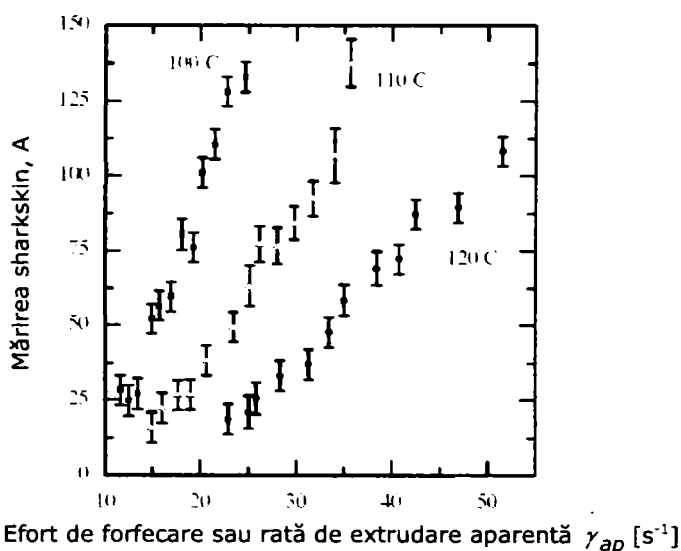


**Figura 2.20.** Curba caracteristică de evidențiere a "sharkskin", pentru materialului Dowlex 2045 LLDPE [WAN 96]

Parametrul principal în apariția *sharkskin* în experimentele pe LLDPE (EG8100) desfășurate de Miller în 2006 a fost amplitudinea ( $A$ ) aproape ciclică a instabilității curgerii (figura 2.21.) [MIL 06].



**Figura 2.21.** Profilul extrudatului de LLDPE cu evidențierea "sharkskin" [MIL 06]



**Figura 2.22.** Mărirea "sharkskin" ca funcție a efortului de forfecare sau ratei de extrudare aparente  $\gamma_{ap}$  în condiții de temperatură constantă în topitură și în zonele de încălzire a filierei:

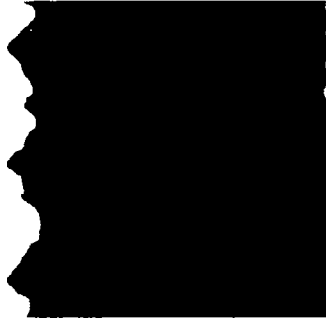
$$T_{mat} = T_1 = T_2; T = 100, 110 \text{ și } 120^\circ\text{C} \text{ [MIL 06]}$$

Experimentele au fost realizate la temperatură constantă a filierei și masei de material  $T_{mat}$  pentru a obține o linie de referință față de care se compară rezultatele obținute funcție de gradientul temperatură dintre pereții filierei. Mărirea "sharkskin" ca funcție a efortului de forfecare sau ratei de extrudare aparente în condiții de temperatură constantă în masă și în zonele de încălzire a filierei ( $T_{mat} = T_1 = T_2$ ;  $T = 100, 110$  și  $120^\circ\text{C}$ ) sunt prezentate în figura 2.22. Se observă o creștere a amplitudinii "sharkskin" odată cu creșterea efortului de forfecare aparentă (rata de curgere)  $\gamma_{ap}$  și scăderea temperaturii [MIL 06].

În figura 2.23. este prezentată o imagine compusă obținută prin utilizarea a



2 fotografii cu suprafețe alăturate a probelor extrudate. Această imagine demonstrează că temperatura locală a filierei și temperatura fluidului din imediata vecinătate a peretelui filierei reprezintă factorii primari ce contribuie la caracterul suprafeței extrudatului. Rugozitatea suprafețelor este dependentă de gradientul temperatură. În partea stângă a figurii rugozitatea a fost obținută la valori ale temperaturii peretelui  $T_{p,1}=100^{\circ}\text{C}$ , și pentru partea dreaptă a imaginii temperatura peretelui a fost de  $T_{p,2}=120^{\circ}\text{C}$ . În ambele cazuri temperatura medie a masei de topitură a fost  $T_{\text{mat}}=110^{\circ}\text{C}$  [MIL 06].



**Figura 2.23.** Dependența rugozității materialului extrudat de temperatură [MIL 06]

De asemenea, cercetările realizate de Achilleos pe materialul m-LLDPE 3128 la temperatura de  $163^{\circ}\text{C}$  arată prezența instabilității "sharkskin" pentru o viteză de forfecare aparentă  $\dot{\gamma}_{ap} = 80\text{s}^{-1}$  și respectiv de fracturare grosieră a topiturii la  $\dot{\gamma}_{ap} = 800\text{s}^{-1}$  (figura 2.24.).



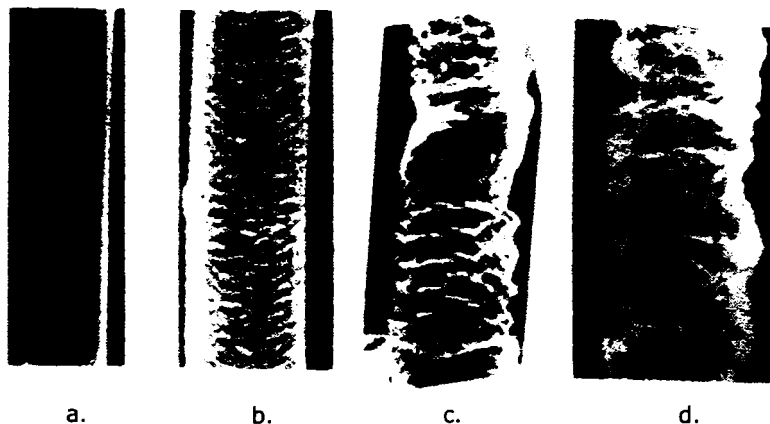
**Figura 2.24.** Evidențierea instabilității curgerii pentru polietilenă extrudată la  $163^{\circ}\text{C}$ :  
a) sharkskin; b) fracturare grosieră a topiturii (gross melt fracture) [ACH 02]

### 2.3.2. Defecte de alunecare intermitentă (sacadată) a topiturii (*stick-slip*) și fracturare masivă a topiturii

La viteze mari de trecere a materialului prin instalație, de obicei extrudatul devine foarte deformat iar presiunea din vâscozimetrul capilar prezintă fluctuații semnificative. Acest fenomen este cunoscut ca *fracturare grosieră a topiturii*.

Figura 2.25. prezintă cercetările realizate de Vlachopoulos [VLA 03] pe extrudate de LLDPE la rate crescătoare ale vitezei de curgere (forfecare), fiind

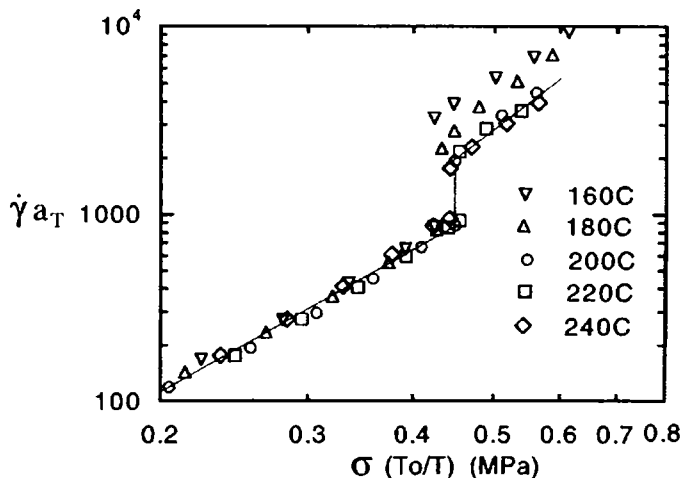
ilustrată trecerea de la suprafață netedă (2.25.a) la cea „piele de rechin - *sharkskin*” (2.25.b) și apoi la fracturarea topiturii - “*stick-slip*” ( 2.25.c, d). Este posibil ca folosind o serie de polimeri să se obțină extrudate fracturate fără piele de rechin, adică suprafețele rămân netede și lucioase, dar extrudatul este deformat în totalitate.



**Figura 2.25.** Extrudat de LLDPE la rate crescătoare ale vitezei de curgere [VLA 03]

Mecanismele răspunzătoare de apariția fracturării topiturii constau în apariția curgerii turbionare, a instabilității elastice din filieră în timpul curgerii, pentru raporturi ale presiunilor mai mari de 10, fenomene de tip “*stick-slip*” precum și alte interacțiuni între polimer și peretele de metal al filierei.

Pentru zona II de curgere (figura 2.14a) în care se manifestă defectul de tip “*stick-slip*”, cercetările de velocimetrie ale lui Bartos și Holomek, au constatat 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 ) [STA 03].



**Figura 2.26.** Dependența dintre viteza de forfecare redusă și solicitarea redusă arătând tranziția “*stick-slip*” și curba caracteristică pentru Dowlex 2045 LLDPE [WAN 96]

Wang S.Q. a analizat materialul LLDPE și a concluzionat că mărirea tranziției “*stick-slip*” este independentă de temperatură pentru  $T \geq 200^\circ\text{C}$  și este

dată în termenii unei lungimi extrapolate  $b$  egală cu 0,15mm. În al doilea rând, tensiunea critică  $\sigma_c$  crește liniar cu timpul  $T$ . Abaterea de la curba principală a datelor de joasă temperatură reprezintă o anomalie care a fost raportată și studiată anterior de Wang și Drda (1996). Figura 2.26. prezintă dependența dintre viteza de forfecare redusă (relativă)  $\gamma_{a_T}$  și solicitarea redusă  $\sigma (T_0/T)$  cu evidențierea tranziției "*stick-slip*" și a curbei caracteristice pentru  $T \geq 200^\circ\text{C}$ , folosind o filieră cu raportul  $L/D=15$ ,  $D=1,04\text{mm}$  și unghiul de intrare de  $60^\circ$ , unde temperatura de referință este  $T_0=200^\circ\text{C}$  [WAN 96].

### 2.3.3. Defectul de tip spumă

Defectele de tip "*spumă*" se referă la formarea progresivă mai întâi a unui depozit de lichid la marginea orificiului de ieșire din filieră care se solidifică și crește și poate să obtureze parțial curgerea produsului de extrudare și/sau să cauzeze suprafețe extrudate defective.

Cauzalitatea apariției acestui defect nu se cunoaște cu adevărat. Observațiile au arătat că formarea spumei nu are loc continuu, ci intermitent. Picături mici de material ies afară din filieră sau formează suprafețe extrudate cu întreruperi. Unele studii sugerează că "*spuma*" apare abundent la polimerii cu greutatea moleculară mică, ceruri sau alți aditivi [VLA 03].

## 2.4. Remedierea defectelor curgerii topiturii polimerice

Chen Y. a analizat materialul LLDPE folosind curgerea capilară cu rata aparentă de forfecare la perete cu valori cuprinse între  $2-3000\text{s}^{-1}$ , temperatură de  $170^\circ\text{C}$  și rată de curgere constantă. Tuburile capilare din diferite materiale (aluminiu 122, cupru 3003-H14, oțel inoxidabil 303 și sticlă) și cu diametre variate sistematic (0,88 – 2,62mm) au fost folosite pentru a determina cantitativ comportamentul de alunecare la perete. S-a observat că alunecarea la perete depinde de materialul capilarului și rugozitatea suprafeței interioare a acestuia. De asemenea, s-a observat alunecare la perete pentru materialele sticlă, cupru și oțel inoxidabil și lipsa alunecării pentru cazul utilizării aluminiului [CHE 92].

Unul dintre remediile pentru reducerea defectelor include repararea defectelor de suprafață ale filierei (corectarea părților lipsă și a imperfecțiunilor marginilor), îndepărtarea umidității din materialul prelucrat, scăderea temperaturii de extrudare și adăugarea de materiale stabilizante. Uneori sunt de ajutor adăugarea de aditivi pe bază de fluorocarbon, la fel ca și la evitarea apariției defectului "*piele de rechin*". De asemenea, la polietilene și policarbonați, se mai practică și micșorarea unghiului de ieșire din filieră (conicitatea), la fel ca și la evitarea defectului de fracturare a topiturii.

Instabilitatea de tip zig-zag se poate remedia prin reducerea presiunilor interfaciale de forfecare.

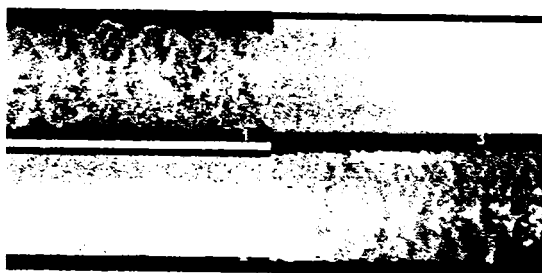
De asemenea, încălzirea locală și precisă a filierei a condus la prevenirea apariției defectului de instabilitate a suprafeței (*sharkskin*) pentru cazul extrudării materialului LLDPE (polietilenă liniară de joasă densitate) [MIL 04].

Au existat o serie de discuții dacă alunecarea dintre polimer și peretele filierei de extrudare cauzează apariția sau evitarea apariției instabilității "*sharkskin*". La ora actuală, se consideră că alunecarea este aceea care conduce la evitarea apariției "*sharkskin*" la rate înalte ale curgerii. O bună aderență se crede de asemenea că aduce un potențial beneficiu, dar alunecarea de tip "*stick-slip*" este

Întotdeauna detrimențială. Pentru a evita defectul "*sharkskin*" la prelucrarea polietilenei liniare de joasă densitate (LLDPE) se pot folosi cantități infime de polimeri fluoro-carbonici. Acești polimeri fluoro-carbonici se depun la suprafața peretelui matriței și permit o alunecare continuă [VLA 03].

Fluoropolimerii au fost tradițional utilizați în industrie pentru a elimina instabilitățile de tip "*sharkskin*" și "*stick-slip*". Utilizați ca strat de acoperire, sau mai eficient în amestec cu polimerul procesat, aceștia măresc viteza de alunecare a extrudatului, ca urmare se reduce energia necesară pentru un anumit debit. În plus, aceștia modifică viteza de forfecare critică de apariție a instabilității până la punctul de început al fracturării grosiere a topiturii, astfel permițând o productivitate superioară. De asemenea, pentru o alunecare continuă se mai folosește și trioxid de bor. Acest aditiv a crescut ordinea de mărime a vitezei de forfecare (*shear rate*) la care se manifestă distorsiunea extrudatului, eliminând complet apariția defectului de tip "*sharkskin*" și "*stick-slip*". Alte remedii privind evitarea apariției instabilității curgerii materialelor polimerice constau în utilizarea teflonului care se comportă ca un accelerant al alunecării la perete [ACH 02].

Experimentele realizate pe materialul polietilenă (PE – 3128 și 116) folosind reometre capilare cu fileră transversală au demonstrat că prin combinarea pudrei de nitrit de bor (NB) cu aditivi fluoropolimerici crește procesabilitatea. Adiția materialului PE-3128 cu 0,05% Teflon sau NB deplasează viteza critică de forfecare aparentă de la care se obține fracturarea polimerului de la  $50 \text{ s}^{-1}$  la  $1300 \text{ s}^{-1}$  sau  $1800 \text{ s}^{-1}$ , în timp ce combinarea teflonului și NB modifică viteza de forfecare critică la  $2400 \text{ s}^{-1}$  așa cum se observă și în figura 2.27. Rezultate similare s-au obținut pentru cazul extrudării PE-116. Adiția a 0,1% NB modifică viteza critică de forfecare la fracturare de la  $110 \text{ s}^{-1}$  la  $900 \text{ s}^{-1}$  în timp ce combinarea a 0,1% NB cu 0,05% Teflon o modifică la  $2000 \text{ s}^{-1}$  [ACH 02].



**Figura 2.27.** Efectul concentrației de NB asupra calității extrudatului de m-LLDPE-3128 obținută la  $617 \text{ s}^{-1}$  și temperatura de  $163^\circ\text{C}$ : **1)** topitură polimerică pură; **2)** 0,02% NB; **3)** 0,1% NB; **4)** 0,5%NB [ACH 02]

## 2.5. Concluzii

În vederea îmbunătățirii instabilității de curgere s-a acceptat extrudarea ca fiind procedeul de definire a comportării reologice a materialelor polimerice, rezultatele experimentale obținute putându-se extrapola și pentru celelalte procedee de punere în formă.

Înțelegerea problematicei este absolut necesară pentru aplicarea cu succes a metodelor reologice cu scopul predicției precise a cauzelor care stau la originea apariției defectelor de extrudare.

Vâscozitatea topiturilor de polimer este influențată de un număr mare de factori printre care cei mai importanți sunt:

- masa molară;
- temperatura;
- presiunea.

Creșterea masei moleculare a polimerului conduce la creșterea vâscozității, deoarece energia de activare variază proporțional cu masa elementelor ce iau parte la curgere.

Temperatura influențează vâscozitatea topiturii și proprietățile tehnologice ale polimerului; sensibilitatea vâscozității la temperatură determină alegerea regimului de prelucrare și calitatea produselor obținute.

Instabilitatea curgerii manifestată prin apariția defectului "*sharkskin*" nu este dependentă de temperatura mediului polimeric în stare de topitură, dar depinde foarte mult de temperatura peretelui din vecinătatea acestuia. Curgerea materialului polimeric trebuie să fie în concordanță cu procesul de prelucrare ales, astfel încât să evite defecte precum:

- matriță umplută parțial;
- apariția de distorsiuni ale extrudatului;
- apariția de părți neuniforme ale profilului sau părți ce vor ceda la presiuni normale de lucru sau la alte impacturi.

Încălzirea locală și precisă a filierei a condus la prevenirea apariției defectului de instabilitate a suprafeței "*sharkskin*" pentru cazul extrudării materialului LLDPE (polietilenă liniară de joasă densitate).

Curgerea materialului plastic reprezintă un indicator de calitate, indicând dacă proprietățile finale ale produsului corespund cu cele impuse de o anumită aplicație.

Creșterea curgerii topiturii polimerice față de cea specificată se traduce prin degradarea moleculelor de polimer, iar o descreștere poate reprezenta rezultatul reacției dintre molecule sau a înlănțuirii acestora.

Cu cât viteza de forfecare crește, cu atât vâscozitatea polimerului scade și curge mai ușor prin dispozitivele și filierele de procesare.

La rate de curgere foarte mari apare o instabilitate a curgerii cunoscută sub numele de "*stick-slip*" (fracturare a topiturii), observată la unele materiale.

Odată cu creșterea temperaturii pentru viteze de curgere constante s-a observat că amplitudinea defectului "*sharkskin*" scade.

Materialele care nu posedă o rată mică de forfecare sunt predispuse la apariția defectului "*sharkskin*".

Formarea defectului de tip "*sharkskin*" se datorează instabilității moleculare a stării de tenșiune raportată la starea instabilă a structurii totale a lanțurilor la regiunea înalt sollicitată de ieșirea din filieră unde lanțurile absorbite oscilează între stările *încurcate* și cele *descurcate*.

La viteze mari de curgere a topiturii de material polimeric prin instalația de procesare se manifestă defecte de tip "*fracturare a topiturii*".

Remediile pentru reducerea defectelor apărute în procesele de prelucrare includ:

- repararea defectelor de suprafață ale filierei (corectarea părților lipsă și a imperfecțiunilor marginilor);
- micșorarea unghiului de ieșire din filieră;
- îndepărtarea umidității din materialul prelucrat;
- scăderea/creșterea temperaturii de extrudare;
- adăugarea de materiale stabilizante - folosirea fluoropolimerilor;
- reducerea presiunilor interfaciale de forfecare;
- încălzirea locală și precisă a filierei, etc.

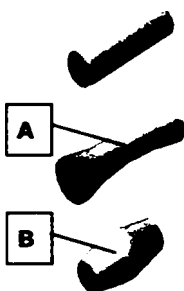
# CAPITOLUL III

## CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND UNDELE ULTRASONICE

### 3.1. Unde acustice

#### 3.1.1. Câmpul acustic. Tipuri de unde

O parte din energia de vibrație, pe care o posedă un corp la un moment dat, se transmite mediului înconjurător punând în vibrație particulele acestuia. Se produce astfel o perturbație care se transmite din aproape în aproape prin mediul elastic, creându-se unde elastice, care iau alternativ forma unei compresiuni sau a unei rarefieri-expansiuni (figura 3.1.). Undele acustice reprezintă o categorie de unde elastice [BĂD 67].



**Figura 3.1.** Modul de propagare a unei acustice la nivelul punctului material. Expansiune A, compresiune B

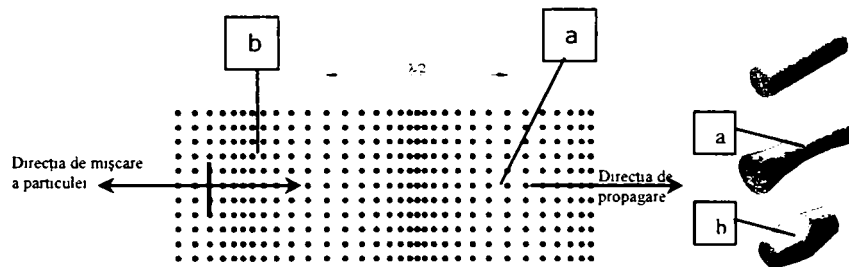
Privite din punct de vedere al frecvenței și deci al senzației pe care o produc asupra organului auditiv uman, se deosebesc următoarele tipuri de unde acustice [AMZ 06]:

- *undele infrasonore*, care au frecvențe inferioare frecvenței sunetului celui mai grav perceput de organul auditiv al omului (0,5... 20 Hz);
- *undele sonore*, care au frecvențe care fac să impresioneze organul auditiv al omului producând senzația de auz (20...20000 Hz);
- *undele ultrasonore*, care au frecvențe ce depășesc frecvența sunetului celui mai înalt perceput de organul auditiv al unui om otologic normal. În general, acestea se consideră ultrasunete, adică unde elastice cu frecvențe cuprinse între 20000 Hz și  $10^9$ ...  $10^{10}$  Hz;
- *undele hipersonore*, care au frecvențe foarte ridicate și nu se mai supun legilor clasice ale mecanicii, necesitând aplicarea legilor mecanicii cuantice. Domeniul lor începe de la aproximativ  $10^{10}$  Hz și se întinde până la  $10^{14}$  Hz, acestor frecvențe corespunzându-le lungimi de undă comparabile cu distanțele interatomice.

Undele sonice sunt vibrații mecanice în solide sau fluide. La fel sunt și ultrasunetele, dar la frecvențe mult mai mari decât rata audibilă a oamenilor – cea mai mică frecvență ultrasonică este, în mod uzual, de 20 kHz (20.000 de cicluri pe secundă). Limita superioară a ratei frecvenței este limitată doar de abilitatea generatorului de semnale – au fost utilizate frecvențe din gama gigaherților (de peste un miliard de cicluri pe secundă).

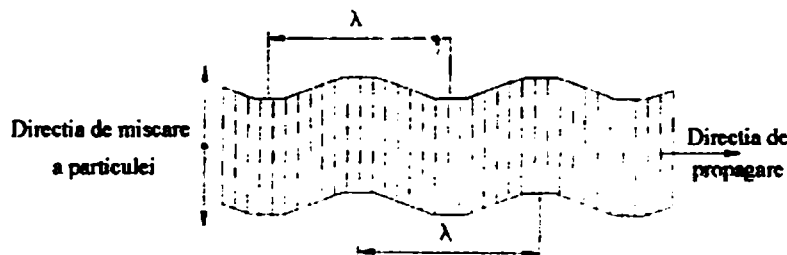
În raport cu traiectoria pe care o pot avea particulele mediului și cu natura și dimensiunile corpului prin care se propagă, undele ultrasonice, întocmai ca toate undele elastice, pot fi de diverse tipuri [BĂD 67] [AMZ 06]:

- *Unde longitudinale* - când traiectoria unei este liniară și deplasarea particulelor se produce în direcția propagării undei (figura 3.2.). Aceste tipuri de unde iau naștere și se pot propaga prin orice mediu elastic, gazos, lichid, solid sau plasmă. Ele produc compresii și rarefieri succesive de-a lungul direcției de propagare în fluide și gaze, iar în solide produc eforturi alternative de întindere și comprimare. Moleculele mediului vibrează în jurul pozițiilor de echilibru, traiectoriile lor fiind drepte, paralele cu direcția de propagare a frontului de undă, viteza de propagare fiind condiționată de forțele de interacțiune dintre particulele mediului. Dacă dimensiunile mediului prin care se propagă undele elastice nu pot fi considerate infinite și devin comparabile cu lungimea unei acustice, undele se numesc în acest caz *cvasilongitudinale*.



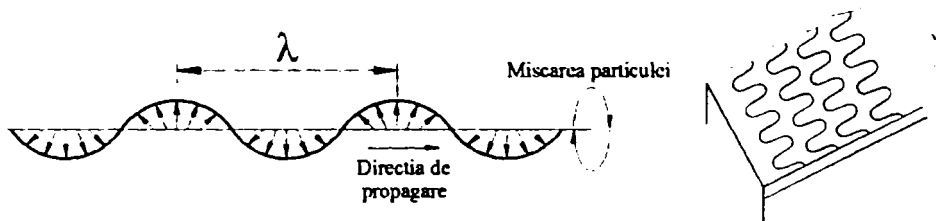
**Figura 3.2.** Propagarea undelor acustice longitudinale. Rarefieri (a), compresii (b)

- *Unde transversale* - când traiectoria unei este liniară, dar deplasarea particulelor se face după o direcție perpendiculară pe direcția propagării undelor (figura 3.3.). Aceste unde se mai numesc și *unde de alunecare* și se formează numai în mediile solide, deoarece au legăturile moleculare asigurate;



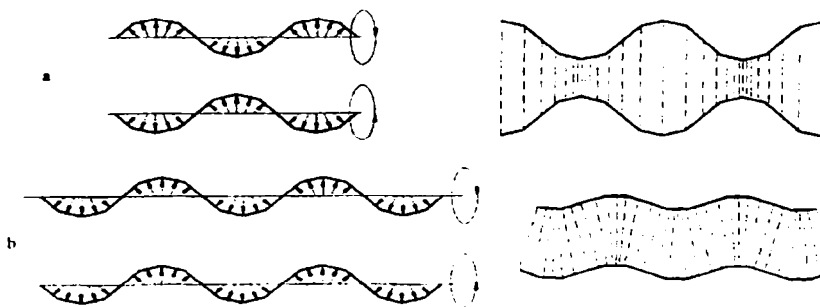
**Figura 3.3.** Propagarea undelor acustice transversale;  $\lambda$  – lungimea de undă [AMZ 06]

- *undele de torsiune* - când traiectoria particulei mediului este circulară într-un plan perpendicular pe direcția de propagare a frontului de undă, iar mediul are dimensiuni finite. Undele de torsiune apar în medii solide de tipul barelor solicitate la torsiune;
- *Unde Rayleigh* - când traiectoria particulei este un cerc având ca centru poziția de repaus și care este conținut într-un plan paralel cu direcția de propagare. Acest tip special de unde apare pe suprafața liberă a unui corp solid sau a unui mediu lichid și se mai numesc și *unde de suprafață*. Sub acțiunea acestor unde, suprafața corpului va avea o mișcare longitudinală și una transversală, moleculele executând o traiectorie eliptică la trecerea frontului. Dacă se cercetează o secțiune transversală într-un mediu prin care se propagă unde Rayleigh, se constată că particulele execută mai întâi o elipsă dextrogiră în raport cu direcția de propagare a undei și ale cărei axe se schimbă până ce particulele vibrează numai în direcția verticalei și apoi o elipsă levogiră care se atenuează până la 1% din amplitudinea de vibrație la o adâncime de o lungime de undă de suprafață (figura 3.4.).



**Figura 3.4.** Propagarea undelor Rayleigh sau de suprafață [AMZ 06]

- *Unde Lamb* - când undele elastice sunt generate în plăci subțiri sau în bare subțiri, caracteristicile de transmisie depinzând de lungimea de undă ultraacustică, de tipul solidului și de dimensiunile plăcii sau barei. Mișcarea particulei la astfel de tipuri de unde este deosebit de complexă, fiind asemănătoare cu cea a undelor transversale, când dimensiunile corpului solid sunt comparabile cu lungimea de undă a ultrasunetului sau cu cea a undelor de suprafață, când grosimea plăcii este egală sau chiar mai mică decât lungimea de undă a ultrasunetului. Undele Lamb pot fi *simetrice* (figura 3.5.a) sau *asimetrice* (figura 3.5.b).



**Figura 3.5.** Propagarea undelor Lamb [AMZ 06]



Regiunea mediului elastic care se găsește în stare de vibrație și care este sediul unor unde acustice se numește *câmp acustic*. În cazul particular când undele acustice produc senzația de auz, sediul acestor unde se numește câmp sonor, iar când undele acustice nu impresionează organul auditiv, având frecvențe mai mari de 20 000 Hz, se numește *câmp ultrasonor*. Locul geometric al tuturor punctelor din câmpul acustic care sunt la un moment dat în fază poartă numele de *frontul undei*.

### 3.1.2. Mărimi acustice

În studiile legate de propagarea undelor ultrasonore prin medii diferite, pe lângă viteza particulei și presiunea acustică, se mai folosesc frecvent și alte mărimi acustice deosebit de importante, definite în continuare.

**Impedanța acustică specifică  $Z_s$** , este o mărime complexă definită ca raportul dintre presiunea acustică de amplitudine complexă spațială  $p$  și viteza particulei în lungul direcției de propagare de amplitudine complexă spațială  $v$ , adică [AMZ 06]:

$$Z_s = \frac{p}{v} \quad (3.1)$$

În cazul particular al undelor progresive, care se propagă într-un mediu nelimitat, fără pierderi de energie, presiunea acustică și viteza particulei găsindu-se în fază, impedanța acustică specifică este o mărime reală [BĂD 67]:

$$Z_s = \rho \cdot c \quad (3.2)$$

în care:  $\rho$  - densitatea mediului;

$c$  - viteza de propagare a undei acustice prin acel mediu.

**Densitatea de energie acustică  $E$**  reprezintă raportul dintre energia acustică și volumul în care ea este conținută. În cazul undelor plane progresive, densitatea de energie acustică medie este dată de relația:

$$E = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c^2} \quad (3.3)$$

în care:  $p_{ef}$  - presiunea medie pătratică.

**Intensitatea acustică.** În cazul undelor plane progresive, legea conservării energiei arată că intensitatea acustică trebuie să fie aceeași în toate punctele undei.

Dacă energia acustică trece printr-o suprafață de secțiune unitară, cu viteza  $c$ , lungimea coloanei de energie care se scurge în unitatea de timp devine egală cu  $c$ , iar energia totală din această coloană este  $cE$ , deci:

$$I = c \cdot E \quad (3.4)$$

Ținând cont de relația 3.3 putem spune că:

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c} \quad (3.5)$$

Cunoscând legătura care există între presiunea acustică și viteza particulei rezultă că:

$$I = \rho \ c \ u_{ef}^2 \quad (3.6)$$

În cazul undelor sferice, care se propagă în toate direcțiile într-un mediu elastic, unde emise de o sursă punctuală de putere  $P$ , intensitatea acustică într-un punct aflat la distanța  $r$ , de această sursă variază invers proporțional cu pătratul distanței:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (3.7)$$

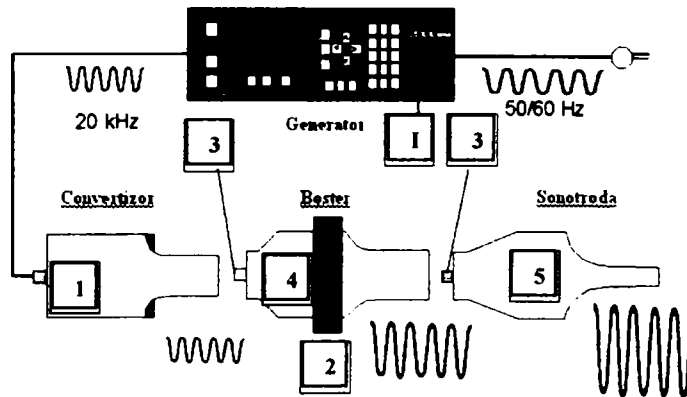
În afară de mărimile absolute indicate mai sus, în acustică se mai folosesc mărimi relative, definite ca logaritmul zecimal al raportului a două mărimi absolute (intensități acustice sau presiuni acustice) [AMZ 06]:

$$\Delta L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (\text{nivelul de presiune acustică}) \quad (3.8)$$

$$\Delta L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (\text{nivelul de intensitate acustică}) \quad (3.9)$$

## 3.2. Construcția generală a sistemelor ultraacustice

### 3.2.1. Părțile componente ale sistemului ultraacustic

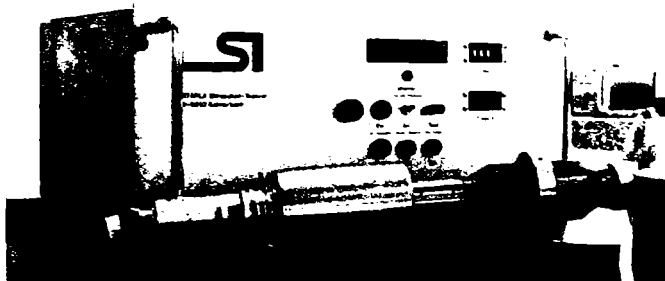


**Figura 3.6.** Părțile componente principale ale sistemului ultraacustic [BRA 01]

Schema generală de principiu a unui sistem ultraacustic este prezentată în figura 3.6. Acesta are în componența sa generatorul de frecvență ultrasonică (I) și ansamblul ultrasonic (II). În alcătuirea ansamblului ultrasonic intră transductorul piezoceramic (1), elementele de fixare mecanică cu izolare acustică (2), elementele de interconectare de tip nipluri (3), transformatorul amplificator de undă intermediar

(4) și scula activă de lucru – sonotroda (5). Aceste elemente constitutive ale sistemului conferă funcționalitate ansamblului după cum urmează:

**Generatorul de ultrasunete** - are rolul de a transforma frecvența industrială (50Hz) a curentului alternativ de la rețea în frecvență ultrasonică (20 – 40kHz) aplicată transductorului din componența ansamblului ultrasonic (figura 3.7.).



**Figura 3.7.** Generator de ultrasunete

Aceste generatoare furnizează la ieșire energie electrică în banda de frecvențe ultrasonore, la parametrii corespunzători excitării transductoarelor electroultraacustice, la rezonanță [VOL 02].

Generatoarele universale se pot lega cu o diversitate mare de transductoare, în funcție de cerințele folosirii ultrasunetelor, admitând o varietate mare a parametrilor: putere, frecvență, tensiune, impedanță.

În cazul generatoarelor specializate, parametrii de ieșire sunt invariabili, lucrând doar la o frecvență fixă și o putere de ieșire constantă. Randamentul generatorului depinde de tipul dispozitivului de convertire a frecvenței, de calitatea subsansamblelor și a pieselor folosite în construcția lor.

La materialele plastice se utilizează generatoare de înaltă frecvență în domeniul 20 – 40kHz.

Generatoarele de înaltă frecvență permit reglarea frecvenței în limitele domeniilor de frecvență specificate anterior. La instalațiile unde este necesară o reglare mai largă a parametrilor de ieșire se folosesc generatoare universale prevăzute cu un domeniu mai larg al modificării frecvenței.

Generatoarele de înaltă frecvență sunt caracterizate de:

- caracteristici electrice;
  - frecvența de lucru;
  - puterea de ieșire;
  - randamentul;
  - stabilitatea și precizia de reglare a frecvenței;
  - asigurarea stabilității amplitudinii oscilațiilor mecanice.
- caracteristici neelectrice - se referă la particularitățile constructive ale generatorului.

Toți parametrii (frecvență, curent, tensiune) trebuie să fie continuu monitorizați și reglați automat pentru a menține sistemul să lucreze corespunzător.

Puterea generatoarelor de înaltă frecvență se încadrează în seria de puteri nominale de: 0,04; 0,1; 0,25; 0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250kW. Pentru materiale plastice se folosesc valori de la începutul șirului.

**Ansamblul ultrasonic** - are rolul de a transforma energia electrică de frecvență ultrasonică (primită de la generatorul de ultrasunete) în energie mecanică de frecvență ultrasonică prin intermediul transductorului și apoi de a o concentra în zona de acțiune a sculei de lucru (sonotroda).

Transductorul transformă energia electrică de înaltă frecvență în oscilații mecanice de frecvență înaltă (frecvență ultrasonică). Deoarece oscilațiile furnizate au o valoare mică a amplitudinii (0,5 - 1,5  $\mu\text{m}$ ) la transductor se cuplează un amplificator intermediar. La amplificatorul intermediar se cuplează sonotroda care constituie elementul activ, scula, prin care se transmite energia ultrasonică în zona de lucru. Lungimea sonotrodei se alege astfel încât la capătul activ al acesteia să se obțină amplitudinea maximă a oscilației impusă în procesul de prelucrare.

Elementele ce intră în alcătuirea ansamblului ultrasonic sunt:

- transductorul electromecanic;
- transformatorul acustic intermediar – booster;
- scula – sonotroda;
- elemente de fixare și interconectare.

### 3.2.2. Clasificarea sistemelor ultraacustice

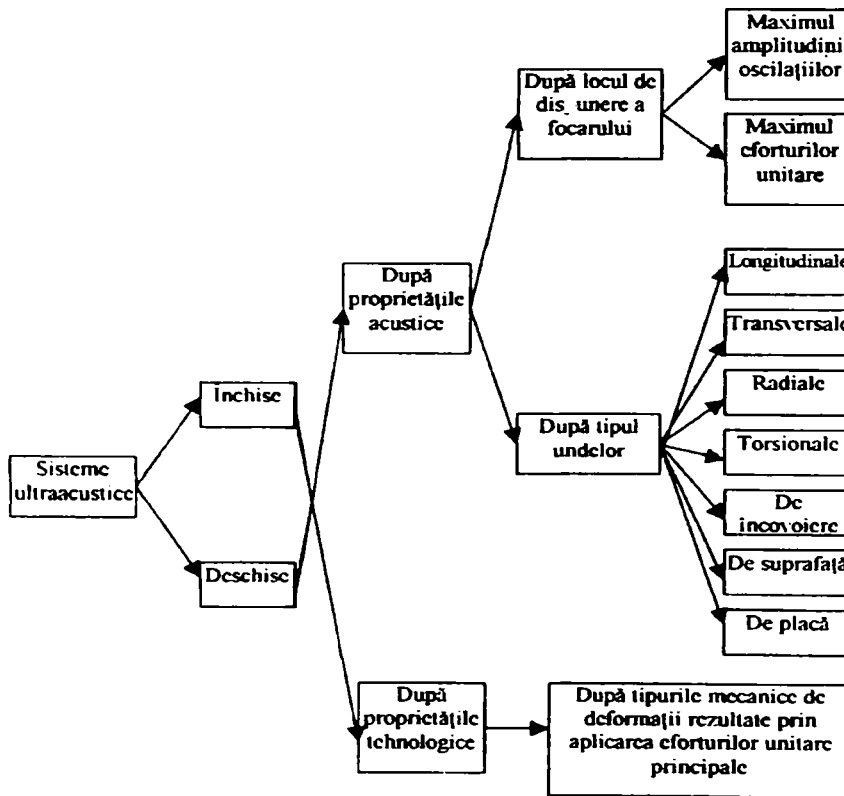


Figura 3.8. Clasificarea sistemelor ultraacustice [AMZ 06]

Orice sistem ultraacustic, în funcție de scopul propus, poate lucra în regim de nerezonanță sau în regim de rezonanță, cu unde staționare sau unde nestaționare. În majoritatea domeniilor de utilizare a ultrasunetelor se folosesc undele staționare, care permit să se obțină: condiții optime de lucru ale sistemului, creșterea eficienței, posibilitatea concentrării energiei ultrasonore, simplitate constructivă, izolare acustică bună precum și o serie de avantaje tehnologice. Sistemele ultraacustice se calculează și se execută în așa fel încât în partea terminală să se excite oscilații de un singur tip, deoarece în caz contrar apar mari dificultăți în crearea regimului de lucru la rezonanță

și în izolarea acustică față de mediu. Pentru aceasta este necesar să existe o relație bine definită între geometria diferitelor elemente ale sistemului și lungimea de undă a vibrațiilor excitate în sistem. O clasificare a sistemelor ultraacustice cu largă aplicabilitate în practică, luând în considerare criteriile cele mai reprezentative este prezentată în figura 3.8. [AMZ 88].

### 3.2.3. Cerințe ce se impun sistemelor ultraacustice

Sistemele ultraacustice depind în mare măsură de aplicațiile specifice pentru care au fost proiectate, fiind din această cauză foarte variate, având în vedere marea diversitate a utilizării lor. Există totuși o serie de cerințe comune, tehnologice și acustice pe care orice sistem acustic trebuie să le satisfacă [BUJ 06].

**Cerințele tehnologice** trebuie îndeplinite de partea finală a sistemului – transformatoarele acustice, ele fiind legate de precizia de calcul și confecționare, rezistența la uzură și oboseală, rigiditatea sistemului, stabilitatea în funcționare, calitatea îmbinării cu transductorul etc.

**Cerințele acustice** sunt condiționate de necesitatea creării în întregul sistem oscilator a unui regim de oscilație care să permită transmisia eficientă a energiei ultrasonore de la transductor la mediu. Ele pot fi formulate astfel: pierderi minime de energie în transductor și transformator; concentrarea maximă a energiei ultrasonore; stabilirea regimului de rezonanță a sistemului oscilator; adaptarea optimă a sistemului cu generatorul de oscilații electrice; uniformitatea radiației energiei acustice pe toată aria de utilizare; eficiența maximă; sensibilitate maximă; directivitate maximă; stabilitatea funcționării sistemului oscilator în timp; posibilitatea controlului principalilor parametri de funcționare în orice moment al funcționării; simplitatea tehnologică și constructivă a elementelor componente și a întregului sistem oscilator în ansamblu; fiabilitate sporită.

Stabilitatea în timp a funcționării sistemului oscilator depinde de stabilitatea funcționării generatorului de ultrasunete, de gradul de conservare a parametrilor întregului sistem și de variația rezistenței sarcinii.

### 3.2.4. Transductoare electromecanice

Au rolul de a transforma energia electrică de înaltă frecvență în oscilații mecanice (vibrații) de înaltă frecvență (frecvență ultrasonică). Este un sistem de acordare, rezonant la frecvența de operare.

Energia electrică poate fi trasformată în energie mecanică prin diferite procese fizice rezultate din interacțiunea câmpului electric sau magnetic cu materia. Transductoarele electromecanice sunt corelate cu forțele mecanice care produc sau sunt produse de câmpurile electrice prin unul din următoarele efecte [AMZ 88]:

- piezoelectric electrostrictiv;
- magnetostrictiv;
- electrodinamic;
- electromagnetic.

Efectul piezoelectric constă în apariția unor sarcini electrice induse pe suprafața unui corp supus la presiuni mecanice. Mărimea sarcinii electrice este proporțională cu tensiunea mecanică aplicată, iar semnul se schimbă în raport cu deformarea (dacă acesta este de dilatare sau de comprimare). Fenomenul poate avea loc și invers: dacă asupra corpului cu proprietăți piezoelectrice se aplică un câmp electric, acesta suferă o deformare mecanică proporțională cu câmpul electric aplicat. Deformarea poate fi de dilatare sau comprimare după semnul câmpului electric.

Efectul electrostrictiv constă în modificarea dimensiunilor unui corp datorită aplicării unui câmp electric. Deformarea este proporțională cu puterile pare ale câmpului electric aplicat și din această cauză are numai un singur sens, indiferent de sensul câmpului aplicat. Efectul electrostrictiv este un efect de ordinul doi, putând fi explicat prin modificarea dimensiunilor materialului supus unui câmp electric, datorită interacțiunii dintre acest câmp și polarizarea netă produsă de acesta în material. Se deosebește de efectul piezoelectric și prin faptul că deformarea electrostrictivă este mult mai mică.

Efectul magnetostrictiv se manifestă în materialele feromagnetice ca fier, nichel, cobalt, unele aliaje ale acestora, ferite etc. și constă în apariția unei deformări mecanice la aplicarea unui câmp magnetic într-un astfel de material. Cuplajul dintre magnetizare și deformarea mecanică este o consecință a structurii de domenii a materialelor feromagnetice și a tensiunilor elastice generate, când vectorii magnetici se reorientează după câmpul magnetic aplicat. Efectul de sumare al acestor deformări microscopice induse este o modificare a dimensiunilor corpului pe direcția de aplicare a câmpului magnetic. Ca și în cazul efectului electrostrictiv, semnul deformării este independent de direcția câmpului magnetic, deformarea fiind proporțională cu pătratul cîmpului [AMZ 06].

Datorită avantajelor pe care le prezintă, cele mai utilizate tipuri de transductoare sunt cele piezoelectrice, magnetostrictive și electrostrictive. Deoarece fenomenele de bază care definesc transductoarele electromecanice depind de natura materialelor active utilizate în construcția lor, este necesară mai întâi cunoașterea principalelor materiale și a caracteristicilor lor [AMZ 06].

### 3.2.4.1. Materiale folosite la construcția transducoarelor electromecanice

Materialele active utilizate la construcția transducoarelor electromecanice sunt:

- materiale piezoelectrice;
- materiale magnetostrictive;
- materiale electrostrictive.

**a) Materiale piezoelectrice.** Constantele materialelor elasto-piezoelectrice ale ceramicelor polarizate sunt prezentate în tabelul 3.1. În afara acestor constante, alte mărimi importante ce caracterizează comportarea materialului piezoceramic sunt: factorii de cuplaj electromecanic, factorul de calitate mecanic, factorul de disipare electric, variațiile acestor mărimi funcție de temperatură și câmp, stabilitatea în timp, temperatura Curie.

Fenomenul piezoelectric a fost evidențiat de Curie (1880) și prezintă două aspecte complementare, presiune-electricitate. În efectul direct, aplicarea unei tensiuni mecanice conduce la redistribuirea sarcinilor în volum, rezultând o polarizare volumică și o sarcină electrică indusă pe suprafață; în efectul invers aplicarea unui câmp electric produce deformarea materialului [AMZ 06].

Factorul de calitate mecanic  $Q_m$  caracterizează materialul piezoceramic din punctul de vedere al comportării în oscilație mecanică și este dat de relația:

$$Q_m = \frac{\omega_0 M}{R_m} \quad (3.10)$$

unde:  $M$  – masa sistemului piezoceramic oscilant;

$\omega_0$  – frecvența unghiulară proprie;  
 $R_m$  – rezistența de pierderi mecanice.

**Tabelul 3.1.** Constantele elasto-piezo-dielectrice ale ceramicilor polarizate [AMZ 06]

Mărime	Denumire și definiție	Unități de măsură
$S_{ij}^E$	Constantă elastică în condiții de câmp electric constant. Mărime numeric egală cu raportul dintre deformarea elastică relativă în lungul axei $j$ a unui element piezoelectric și variația tensiunii mecanice aplicate în jurul axei $i$ care provoacă această deformare.	$m^2 \cdot N^{-1}$
$S_{ij}^D$	Constanta elastică în condiții de densitate de sarcină constantă.	$m^2 \cdot N^{-1}$
$Y_{ij}^E$ ; $Y_{ij}^D$	Modulele Young. Mărimi ale căror matrice sunt egale cu matricele elastice respective.	$N \cdot m^{-2}$
$d_{ij}$	Constanta de deformare piezoelectrică. Mărime numeric egală cu raportul dintre deformarea relativă a elementului piezoceramic pe direcția $j$ și variația de câmp electric în direcția axei $i$ care o produce, în condiții de tensiune mecanică exterioară constantă.	$m \cdot V^{-1}$
$g_{ij}$	Constanta de tensiune piezoelectrică. Mărime numeric egală cu raportul cu semn schimbat dintre variația de câmp electric dezvoltată pe direcția axei $i$ și variația de tensiune mecanică, aplicată în direcția axei $j$ , care o produce, în condiții de circuit deschis.	$V \cdot m \cdot N^{-1}$
$\varepsilon_{ij}^T$	Permitivitatea dielectrică la tensiune mecanică constantă. Mărime egală cu raportul dintre variația de inducție (sarcină) electrică în direcția axei $j$ și variația câmpului electric în direcția axei $i$ în condiții de tensiune mecanică nulă sau constantă.	$F \cdot m^{-1}$

Factorul de disipare electric  $tg\delta$ , caracterizează pierderile electrice în material.

Fiecare material este caracterizat printr-o temperatură Curie  $T_c$  ce reprezintă temperatura maximă la care ceramica prezintă proprietăți piezoelectrice.

Factorul de cuplaj  $K$  pentru forme simple este dat de relația:

$$K = \frac{U_m}{\sqrt{U_e U_d}} \quad (3.11)$$

unde:  $U_m$  – densitatea de energie elasto-dielectrică mutuală;

$U_e$  – densitatea de energie elastică;

$U_d$  – densitatea de energie dielectrică.

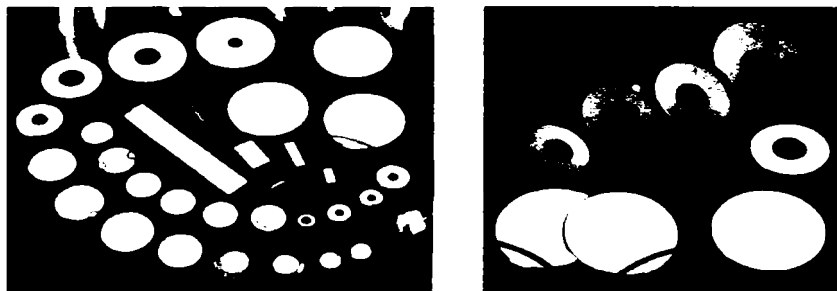
Cele mai utilizate materiale sunt ceramicile piezoelectrice (zirconat titanat de bariu, zirconat titanat de plumb). Caracteristicile comparative ale unor ceramici piezoelectrice sunt prezentate în tabelulele 3.2. și 3.3., iar în figura 3.9. sunt prezentate câteva discuri din materiale piezoceramice utilizate în construcția transductoarelor piezoceramice:

**Tabelul 3.2.** Caracteristicile comparative ale unor ceramici piezoelectrice [AMZ 06]

Constanta	Cer. B	PZT - 2	PZT - 4	PZT - 5	PZT - 5H	PZT - 8
$k^*$	51	72	89	92	100	77
$d_{33}^*$	25	26	49	63	100	46
$g_{33}^*$	37	100	68	63	50	44
$S_{33}^E$	44	71	75	91	100	67
$Q_m$	40	68	50	8	100	100
$T_c$	115°C	370°C	328°C	365°C	193°C	300°C
Temperatura maximă de lucru	70°C	255°C	200°C	250°C	125°C	175°C

**Tabelul 3.3.** Caracteristicile unor materiale piezoceramice [CLE 87]

Simbol material	Constanta dielectrică $\epsilon_{33}$	Tangenta unghiului Pierderi dielectrice (valoarea maximă)		Temperatura Curie (K)	Coeficient de cuplaj electromecanic $\Phi_{em}$	Modulul Young $Ex10^{11}$ (N/m <sup>2</sup> )	Factorul mecanic de calitate, $Q_m$ (valoare minimă)	Viteza de propagare a undei $Cx10^3$ (m/s)
		În câmpuri slabe	În câmpuri de $3x10^5$ (V/m)					
PTZ-19	1525 ± 325	0,035	-	563	0,4	0,55 ÷ 0,85	50	3 ÷ 3,6
PTZ-21	550 ± 150	0,025	-	683 ± 10	0,2	0,85 ÷ 0,95	100	3,5 ÷ 3,8
PTZ-23	1075 ± 225	0,0075	0,04	558 ± 10	0,43	0,65 ÷ 0,85	200	3 ÷ 3,35
PTZ-24	1075±225	0,0075	0,04	553 ± 10	0,45	0,65 ÷ 0,85	200	3 ÷ 3,35
PTZB-3	2-100 ± 400	0,015	0,035	453	0,45	0,7 ÷ 0,9	200	3,45
PTZS-1	1150 ± 150	0,005	0,01	548 ± 15	0,43	0,7 ÷ 0,8	500	3,5

**Figura 3.9.** Discuri piezoceramice [MAS 01]

Avantajele utilizării materialelor piezoceramice (în special a celor de tip PZT) în construcția transductoarelor sunt date de coeficienții de cuplaj electromecanic mari, stabilitatea chimică, temperatura de funcționare relativ ridicată, precum și posibilitatea producerii în forme variate (prin presare) și alegerii oricărei direcții pentru axa de polarizare.

**b) Materiale magnetostrictive.** Fenomenul de magnetostricțiune a fost pus în evidență de Joule (1842) care a constatat că o bară din material feromagnetic își modifică dimensiunile sub acțiunea unui câmp magnetic extern. Efectul magnetostrictiv este un efect par deoarece semnul deformației nu se schimbă la variația sensului câmpului magnetic.



Materialele magnetostrictive se împart în două categorii [AMZ 06]:

- materiale magnetostrictive metalice – nichelul, aliajele de nichel și aluminiu, aliajele de fier și aluminiu, de fier și nichel și aliajele de fier și cobalt (permalloy, permendur, alfer). Acestea sunt construite sub formă de benzi laminate la rece, precum și sub formă de tuburi;
- materiale magnetostrictive ceramice – ferite preparate din pulberi de oxizi de fier, zinc, nichel, mangan, cobalt etc., omogenizate, presate în formele și dimensiunile dorite și sinterizate la temperaturi înalte.

Materialele magnetostrictive metalice sunt caracterizate printr-un coeficient de cuplaj relativ mic comparativ cu cel al ceramicelor piezoelectrice, dar sunt utilizate frecvent în construcția transducoarelor, datorită rezistenței ridicate la solicitări mecanice și temperaturi Curie ridicate.

O deficiență comună a materialelor magnetostrictive metalice este aceea de a favoriza pierderile prin histerezis și prin curenți turbionari.

Materialele ceramice de tip ferite magnetostrictive sunt tot mai folosite întrucât au bune proprietăți magnetice. Acestea prezintă rezistență mecanică mare, iar pierderile prin curenți turbionari sunt practic nule. Proprietățile magnetice ale acestora sunt influențate de compoziția chimică și de factorii tehnologici de procesare.

Prin folosirea feritelor se pot obține transductori care să aibă coeficient de cuplaj magnetomecanic destul de ridicat, comparabil cu cel corespunzător celor mai superioare materiale feromagnetice. Punctul Curie este de asemenea destul de ridicat atîngînd valori ce depășesc 500°C. Întrucât feritele sunt fragile, domeniul de aplicare la generarea vibrațiilor ultrasonice este limitat la emițătoare de intensități mici [BĂD 67].

În tabelul 3.4. sunt prezentate câteva din caracteristicile materialelor magnetostrictive folosite la confecționarea tolelor de grosimi 0,1 ... 0,3mm.

**Tabelul 3.4.** Caracteristicile unor materiale magnetostrictive [CLE 87]

Material	Alfer	Permendur	Nichel	Ferite F38
<b>Viteza de propagare a undei <math>C \cdot 10^3</math> (m/s)</b>	4,75	5,2	4,78	5,94
<b>Densitatea <math>\delta \cdot 10^3</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	6,65÷6,75	8,1	8,85	5,21÷5,27
<b>Coeficient de magnetostricțiune <math>\delta \cdot 10^{-6}</math></b>	+40	+70	-(30÷40)	-9
<b>Inducția de saturație <math>B_s</math> (T)</b>	1,3	2,4	0,6	0,37÷0,54
<b>Permeabilitatea magnetică relativă <math>\mu_r</math></b>	1000	700	400	73÷330
<b>Intensitatea optimă a câmpului de magnetizare <math>H_{opt} 10^3/4</math> (A/m)</b>	6÷30	20÷30	10÷20	5÷16
<b>Coeficient cuplaj electromecanic <math>\varphi_{em}</math></b>	0,25÷0,28	0,25÷0,37	0,15÷0,31	0,14÷0,33

**c) Materiale electrostrictive.** Efectul de electrostricțiune constă în deformarea unui material (amorf sau cristalin, centrosimetric sau polar) la aplicarea unui câmp electric, deformarea fiind proporțională cu puterile pare ale câmpului și independentă de polaritatea acestuia. Deși electrostricțiunea este cuplajul electromecanic de bază în toate solidele nepiezoelectrice, ea a fost destul de puțin studiată și înțeleasă datorită valorilor mici ale deformărilor electrostrictive chiar la

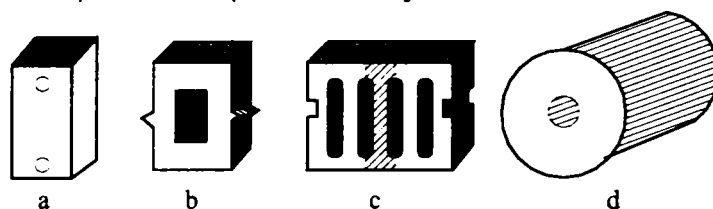
câmpuri electrice aplicate de intensități mari. Cele mai des utilizate materiale sunt ceramicele electrostrictive [AMZ 88, 06].

### 3.2.4.2. Transductoare magnetostrictive

Construcția transducoarelor magnetostrictive se bazează pe proprietatea materialelor feromagnetice, ca fierul și nichelul, de a-și modifica dimensiunile sub acțiunea câmpurilor magnetice [MAR 86].

Acest tip de transductoare funcționează în mod uzual la frecvențe cuprinse în domeniul 18 – 90kHz și puteri acustice cuprinse între 0,04 – 250kW.

Teoria propagării undelor elastice în medii magnetostrictive împreună cu ecuațiile ce descriu mediul respectiv și condițiile la limită pe care trebuie să le satisfacă, aplicate pentru fiecare caz particular, conduc la aflarea modurilor de vibrație și caracteristicilor de funcționare ale transducoarelor magnetostrictive. Cel mai utilizat mod de vibrație este modul longitudinal, caracterizat de o undă elastică longitudinală excitată în circuitul magnetic respectiv, prin intermediul bobinei de comandă; modul de dispunere al acesteia în raport cu transductorul condiționează excitarea modurilor pare sau impare de vibrație.



**Figura 3.10.** Tipuri de transductoare magnetostrictive metalice din tole laminate:  
a – bară; b,c – fereastră; d – cilindric [BUJ 06]

Transducoarele magnetostrictive metalice, spre deosebire de cele ceramice care au rezistivitatea electrică foarte mare, nu se pot confecționa compacte la dimensiunile uzuale, ci numai sub formă de pachet de tole laminate subțiri, izolate electric, pentru micșorarea pierderilor magnetice prin curenți turbionari. Câteva tipuri de astfel de transductoare sunt prezentate în figura 3.10. [BUJ 06].

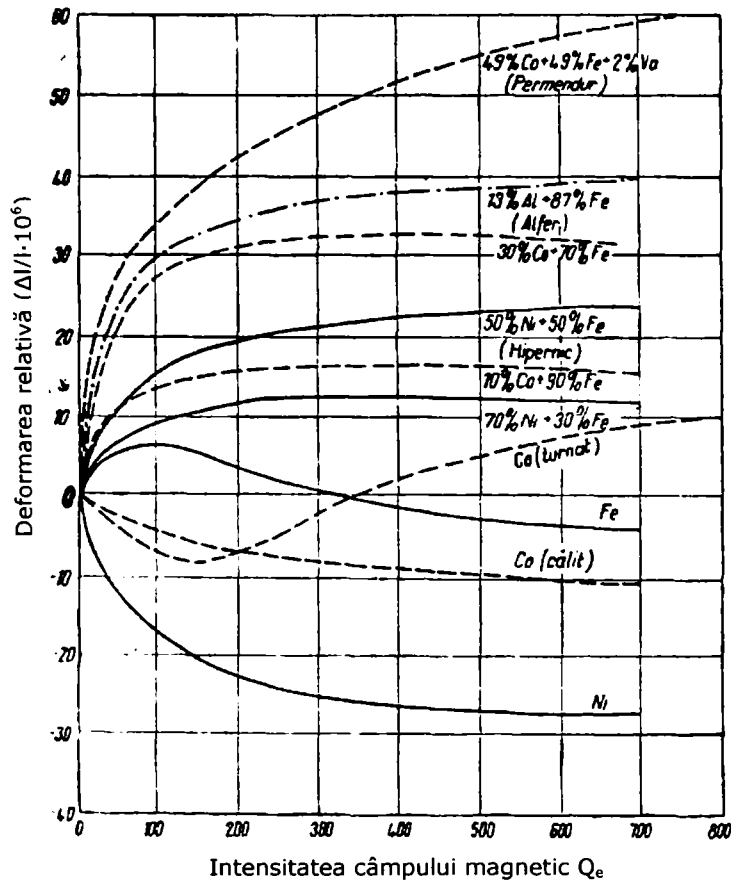
Transducoarele cele mai utilizate, prezentate în figura anterioară, sunt confecționate din tole cu grosimea de 0,1 – 0,3mm, izolate între ele. Tolele sunt confecționate de obicei din materiale magnetostrictive (Alfer, permendur, nichel).

Deformația relativă a unei bare de lungime  $l$  depinde de intensitatea câmpului magnetic conform relației:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = f(H) \quad (3.12)$$

în care:  $\frac{\Delta l}{l}$  - coeficientul static al magnetostricțiunii.

Coeficientul poate avea semn pozitiv, în care caz se produce o alungire a barei, sau poate avea semn negativ, în care caz se produce o scurtare a barei. În figura 3.11. sunt indicate curbele de variație a coeficientului static al magnetostricțiunii în funcție de intensitatea câmpului magnetic pentru diferite materiale feromagnetice.



**Figura 3.11.** Caracteristica magnetostrctivă la diferite materiale [BĂD 67]

Din examinarea diagramei se constată următoarele [BĂD 67]:

- În cazul nichelului și al cobaltului călit, indiferent de intensitatea câmpului magnetic, efectul magnetostrictiv se traduce printr-o scurtare a barei; în cazul unor aliaje ale cobaltului sau ale nichelului precum și al alferului, un aliaj format din 87%Fe și 13%Al, indiferent de intensitatea câmpului magnetic, efectul magnetostrictiv se manifestă printr-o alungire a barei. În fine, în cazul altor materiale ca fierul, cobaltul (turnat), sensul deformării depinde de intensitatea câmpului magnetic aplicat.
- Curbele de variație a coeficientului static al magnetostricțiunii pornesc de la zero și tind către o asimptotă, valoarea corespunzătoare fiind denumită saturație magnetică  $X_s$ . Rezultă deci existența unei anumite valori a intensității câmpului magnetic, caracteristic fiecărui material în parte, pentru care se obține practic efectul maxim.

Funcționarea transductoarelor magnetostrictive este definită de următorii parametri caracteristici: frecvența de rezonanță mecanică, frecvența de rezonanță electromecanică, coeficientul de transformare electromecanic, parametrii echivalenți concentrați, factorul de calitate mecanic, tensiunea electrică produsă la rezonanță, inducția magnetică la rezonanță, caracteristica de frecvență a puterii acustice în

vecinătatea rezonanței, impedanța electrică, puterea electrică consumată, randamentul electromecanic și curenții electrici la rezonanță [AMZ 06].

De o mare importanță în funcționarea la parametri optimi ai transductoarelor magnetostrictive, ca și a celorlalte tipuri de transductoare electromecanice, este acordul care se realizează între parametrii de intrare ai transductorului (frecvență de rezonanță, impedanță) și parametrii de ieșire ai generatorului, astfel încât randamentul transformării electromecanice să fie maxim. Reactanța inductivă a bobinei transductoarelor magnetostrictive se adaptează de obicei printr-un condensator serie, care blochează în același timp curentul continuu de polarizare pentru a nu ajunge la generatorul de înaltă frecvență. Datorită rezistenței mecanice superioare a materialelor magnetostrictive, care permite utilizarea lor la puteri electrice mari și solicitări mari în timpul funcționării, transductoarele magnetostrictive metalice sunt utilizate prioritar pentru producerea puterilor mari la frecvențe apropiate de limita inferioară a domeniului ultrasonor (20...42 kHz). Odată cu creșterea frecvenței, pierderile magnetice cresc, astfel încât la frecvențe mai mari (peste 80 kHz) se impune utilizarea transductoarelor confecționate din materiale ceramice [AMZ 06].

Gama frecvențelor obținute cu ajutorul transductoarelor magneto-strictive nu este prea largă, fiind în general mai îngustă decât cea acoperită de transductoarele piezoelectrice. Ea se întinde de la câțiva kiloherți până la aproximativ 200 kHz. Construirea unor transductoare magnetostrictive de frecvențe și mai ridicate este legată de dificultăți mecanice de neînlăturat, datorită faptului că, pe lângă dimensiunile mici pe care trebuie să le aibă un astfel de emițător, mai intervine și problema pierderilor electrice prin histerezis și prin curenți Foucault. Acestea provoacă încălzirea și deci dilatarea barei, iar ca urmare, proprietățile elastice și geometrice ale barei se modifică, ceea ce provoacă bineînțeles și o modificare a frecvenței proprii de vibrație [BĂD 67].

### 3.2.4.3. Transductoare piezoceramice

Aceste transductoare, pe baza efectului piezoelectric invers, 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 - figura 3.12.

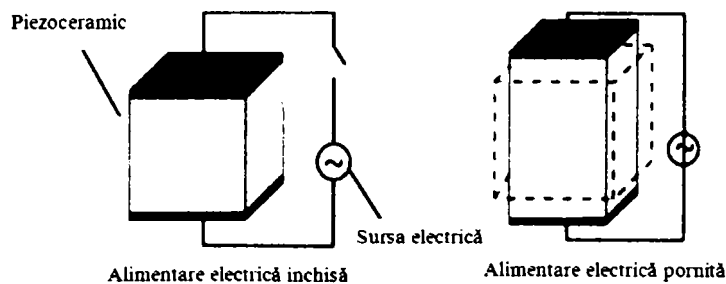
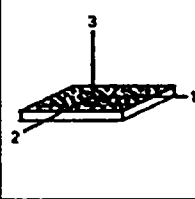


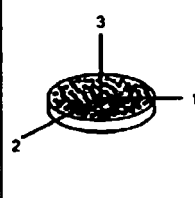


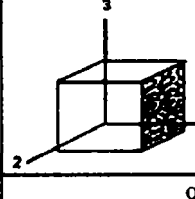
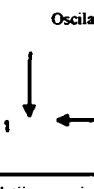
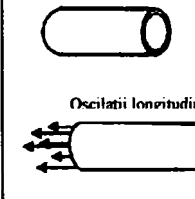





Figura 3.12. Efectul piezoceramic [NDT 01]

Modurile de oscilare sunt determinate de geometria componentei piezoceramice, de proprietățile mecanoelastice ale acesteia și de direcția de polarizare. Cele mai importante moduri de oscilații ale rezonatoarelor cele mai

comune sunt prezentate în figura 3.13. De asemenea, sunt prezentate și constantele caracteristice ale acestora.

Axele	Tipul transductorului	Coefficienți
	<b>Oscilații pe grosime</b> Polaritate Domeniu Deformație 	$d_{31}, g_{31}, k_{31}$ $s_{33}, \rho$ $\epsilon_{33}$
	<b>Oscilații longitudinale</b> 	$d_{31}, g_{31}, k_{31}$ $s_{11}, \rho$ $\epsilon_{31}$
	<b>Oscilații radiale</b> 	$d_{31}, g_{31}, k_p$ $s_{11}, \rho$ $\epsilon_{33}$
	<b>Oscilații pe grosime</b> 	$d_{31}, g_{31}, k_{31}$ $s_{33}, \rho$ $\epsilon_{33}$
	<b>Oscilații de forfecare</b> 	$d_{15}, g_{15}, k_{15}$ $s_{44}, s_{44}^D, \rho$ $\epsilon_{11}$
	<b>Oscilații pe grosime (grosimea peretelui)</b> 	$d_{31}, g_{31}, k_{31}$ $s_{33}, \rho$ $\epsilon_{33}$
	<b>Oscilații longitudinale</b> 	<b>Oscilații radiale</b> 

**Figura 3.13.** Direcții posibile de oscilare ale componentelor piezoceramice [PIC 01]

În tabelul 3.5. se dau ca exemple transductoare generatoare de ultrasunete piezoelectrice fabricate în țară, cu puteri limite maxime de 100, 150, 300 și 500 W și frecvențe nominale 20, 25 și 40 KHz.

**Tabelul 3.5.** Caracteristici ale unor transductoare piezoelectrice [VOL 02]

Tipul transductorului	P rwi	$f_s$ [KHz]	$f_p$ [KHz]	m [Kg]	I [mA]	Co [nFl]
TGUS 100-020-2	100	20±1	22±2	0,65	300	4,2±0,6
TGUS 100-025-2	100	25±1	27±2	0,6	300	4,2±0,6
TGUS 150-040-1	150	40±2	43±2	0,26	300	4,1±0,6
TGUS 150-040-2	150	40±2	43±2	0,26	300	4,1 ± 0,6
TGUS 300-020-1	300	20±1	22±2	0,7	400	4,1±0,6
TGUS 500-020-1	500	20±1	22±2	1,1	500	5,8±0,6

Principalele caracteristici ale transducoarelor de ultrasunete, pe lângă cele din tabelul 3.5., sunt: tangenta unghiului de pierderi maxim  $tg\delta = 15 \times 10^{-3}$ , factorul de cuplaj efectiv minim  $k_{ef} = 0,25$ , factorul de calitate mecanic în aer  $Q_{m0} \geq 15$ , eficiența optimă  $\eta_0 \geq 85\%$  în condiții normale de temperatură, umiditate și presiune atmosferică.

Puterea electrică maximă în sarcina  $P$  este puterea electrică activă maximă admisă, măsurată la bornele transductorului pentru încărcare cu sarcină acustică normală. Factorul de cuplaj efectiv  $k_{ef}$  are următoarea relație [VOL 02]:

$$k_{ef} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_s}{f_p}\right)^2} \quad (3.13)$$

unde:  $f_s$  - frecvența serie,  $f_p$  - frecvența paralel.

Acest factor rezultă din radicalul raportului dintre energia transformată și energia totală înmagazinată de transductor la frecvențe joase.

Factorul de calitate mecanic  $Q_{m0}$  caracterizează pierderile transductorului fără sarcină, relația sa de calcul fiind:

$$Q_{m0} = \frac{f_p}{\Delta f_p} \quad (3.14)$$

unde  $\Delta f_p$  reprezintă banda de trecere la 3 dB în jurul frecvenței de rezonanță paralel  $f_p$ .

Eficiența optimă a transductorului reprezintă randamentul maxim al acestuia obținut la încărcarea sa optimă, relația sa de calcul fiind:

$$\eta_0 = 1 - \frac{2}{k_{ef}} \cdot \sqrt{\frac{tg\delta}{Q_{m0}}} \quad (3.15)$$

Materialul piezoceramic, datorită conținutului mare de plumb, este toxic. Bucățile de piezoceramică rezultate prin eventuala sfărâmare a elementelor piezoceramice se manipulează cu măsuri de precauție corespunzătoare [VOL 02].



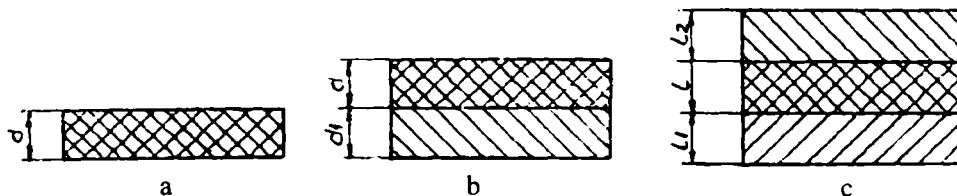
**Figura 3.14.** Transductor piezoceramic

Transducoarele piezoceramice (figura 3.14.) sunt cele mai utilizate în prezent în construcția transducoarelor acustice. Aceste transducoare pot fi

realizate din materiale ca titanat de bariu, zirconat-titanat de plumb (PZT), etc. și prezintă o serie de avantaje cum ar fi:

- constantă piezoelectrică ridicată,
- higroscopicitate redusă,
- constantă dielectrică mare,
- rezistența mecanică și electrică relativ mare.

Transductoarele piezoceramice pot fi construite în jumătate de lungime de undă ( $\lambda/2$ ), în sfert de lungime de undă ( $\lambda/4$ ) sau compuse (figura 3.15.) [CLE 87]:



**Figura 3.15.** Transductoare piezoceramice: **a)** în jumătate de lungime de undă ( $\lambda/2$ ); **b)** în sfert de lungime de undă ( $\lambda/4$ ); **c)** compuse [CLE 87]

Transductorul construit în jumătate de lungime de undă ( $\lambda/2$ ) se compune dintr-o placă piezoceramică a cărei grosime  $d$ , corespunzătoare frecvenței de rezonanță de bază, se calculează cu relația:

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_0} \quad (3.16)$$

unde:

- $\lambda$  – lungimea de undă a materialului transductorului;
- $c$  – viteza sunetului prin materialul piezoceramic;
- $f_0$  – frecvența de rezonanță.

Transductorul în sfert de undă ( $\lambda/4$ ) se compune din două plăci îmbinate rigid din care una este confecționată din material piezoceramic și are grosimea:

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_0} \quad (3.17)$$

Cea de-a doua placă, numită placă de radiație sau radiator, este confecționată din metal (oțel, aluminiu etc.) având grosimea:

$$d = \frac{\lambda_1}{4} = \frac{c_1}{4f_0} \quad (3.18)$$

- unde:  $\lambda_1$  – lungimea de undă prin metalul din care este confecționat radiatorul;
- $c_1$  – viteza sunetului prin metalul din care este confecționat radiatorul.

Transductorul compus este format din 3 plăci. Placa din mijloc este din material piezoceramic iar cele extreme din metal. Aceste transductoare se folosesc în domeniul frecvențelor joase (cca 20 kHz).

În anexa A2 este prezentat un studiu comparativ între transductoarele magnetostrictive și cele piezoceramice [ICL 02] [STA 03].

### 3.2.5. Transformatoare (concentratoare adaptoare de undă) acustice

Denumirea de transformator, ghid de undă, concentrator adaptor de undă, amplificator intermediar, booster sau sonotrodă reprezintă în esență același corp, componentă funcțională și anume corpul de legătură mecanică dintre suprafața ultrasonic radiantă a transductorului și cea receptoare a unui obiect-sculă care interacționează cu mediul activat. Acest ultim obiect-sculă poate în numeroase aplicații să lipsească, activarea mediului făcându-se direct de capătul activ al concentratorului adaptor de undă (sau sonotrodă).

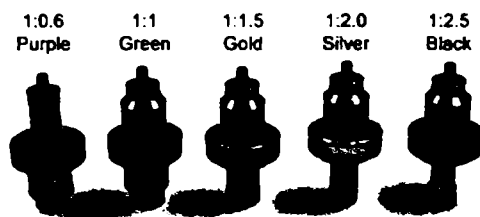
În majoritatea covârșitoare a aplicațiilor acest corp - componentă funcțională - asigură pe lângă transmiterea energiei și concentrarea acesteia, de unde în majoritatea lucrărilor se folosește denumirea de *concentrator adaptor de undă* (literatura autohtonă) respectiv "*horn*" sau "*sonotrodă*" (literatura străină).

Pentru a optimiza transmiterea energiei ultrasonice (cu pierderi și solicitări minime pe traseu) numeroase construcții de concentratoare ultrasonice folosesc un corp adaptor de undă "*intermediar*" denumit booster și al cărui rol funcțional este similar cu cel al unei cutii de viteză într-o transmisie mecanică.

#### 3.2.5.1. Amplificatorul intermediar (Booster-ul)

Opțional, amplificatorul intermediar poate fi montat între transductor și scula ultrasonică. Acesta are rolul de a transmite energia acustică de la transductor la sculă (sonotrodă, care constituie elementul activator), producând mărirea amplitudinii undei și este construit dintr-un material care să reziste cât mai bine la uzură și la oboseală (oțeluri, titan sau aliaje de aluminiu de înaltă rezistență). Amplificatorul intermediar este, de asemenea, rezonant la frecvența de lucru. Se acordă o atenție deosebită geometriei acestui element. Concentratorul furnizează amplitudinea utilă în condițiile unor pierderi minime de energie și a unor rezistențe ridicate la uzură și oboseală. De asemenea, fixarea pe mașina de lucru a întregului ansamblu acustic - transductor-booster-sonotrodă - se face de regulă prin booster la nivelul planului său neutru.

Amplificatoarele intermediare funcționează cu următoarele raporturi de amplificare: 1:2,5; 1:2; 1:1,5; 1:1; 1:0,6; 1:0,5; 1:0,4, acest lucru mărind în mod evident domeniul de utilizare al echipamentelor. Câteva exemple de amplificatoare intermediare boostere sunt prezentate în figura 3.16.



**Figura 3.16.** Factorul de amplificare al transformatoarelor intermediare de undă din titan [BRA 02]



### 3.2.5.2. Sonotroda (concentratorul adaptor de undă)

Sonotroda, denumită și concentrator adaptor de undă, reprezintă partea finală a instalației acustice care transmite toate elementele acustice dorite în procesul tehnologic la parametrii impuși de tehnolog.

Penru a lucra cu un randament cât mai bun, concentratorul trebuie acordat cu o aproximație de câteva perioade cu frecvența cu care este calculat transductorul ultrasonic, deci întregul sistem oscilant trebuie să lucreze în regim de rezonanță pentru ca amplitudinea vitezei particulei la vârful sculei să fie cât mai mare și deci și intensitatea acustică să fie mare [AMZ 06].

Fiecare element se dimensionează pe principiul frecvenței de rezonanță, caz în care lungimea lui trebuie să fie un număr întreg de jumătăți de lungimi de undă. Lungimea sonotrodei se alege astfel încât la capătul activ al acesteia să se obțină amplitudinea maximă a oscilației impuse la frecvența de rezonanță.

Sonotroda este singura parte a sistemului care este unică pentru fiecare proces ultrasonic. Sonotrodele se realizează în toate formele și mărimile, funcție de aplicație, dar ca și celălalte componente trebuie să fie rezonante la frecvența de operare, figura 3.17.

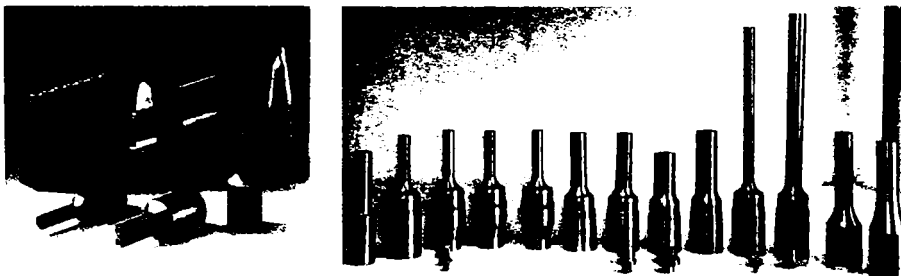


Figura 3.17 Tipuri de sonotrode [MAS 01]

Sonotrodele îndeplinesc în general următoarele funcții:

- transferă energia ultrasonică de la transductor spre locul prelucrării;
- concentrează și focalizează energia ultrasonică în zona de lucru;
- mărește amplitudinea decalajului frontului de ieșire al amplificatorului intermediar, constituind totodată și un adaptor de impedanță acustică între amplificatorul intermediar și sarcina din spațiul de lucru;
- sporesc la maxim randamentul activării cu ultrasunete a materialelor polimerice.

Modificarea impedanței acustice și a vitezei de oscilație la sonotrode se realizează prin varierea secțiunii transversale. Funcție de tipul lor, sonotrodele se împart în două categorii:

- **sonotrode primare**, care pot fi:
  - cilindrice în trepte;
  - conice;
  - exponențiale;
  - catenoidale etc.
- **sonotrode de contur** (folosite în principal la sudarea materialelor după contur).

Materialul folosit la realizarea sonotrodei este un compromis între nevoile ultrasonice și aplicație. Se folosesc materiale cu un coeficient de frecare internă

scăzut, deci care opun o inerție mică transmiterii vibrațiilor, provocând totodată și o amortizare minimă a acestor vibrații. Până în prezent, materialul cel mai bun pentru construcția sonotrodelor este considerat titanul care prezintă rezistență mecanică ridicată și coeficient de frecare internă scăzut. Pe lângă titan se mai folosesc și aliaje de titan (TiAlV64), oțeluri, oțeluri inoxidabile, ceramici puternice, aluminiu și aliaje din aluminiu (AlCuMg<sub>2</sub>, AlCuMgPb, etc.).

În cazul aplicațiilor speciale se realizează sonotrode din oțel inoxidabil, sticlă sau ceramice. Amplitudinea maximă a sonotrodelor realizate din aceste materiale este semnificativ sub cele ale sonotrodelor de titan.

Elementele geometrice ale sonotrodelor se calculează folosind programe software specializate sau cu ajutorul ecuațiilor matematice diferențiale.

Pentru calcularea transformatoarelor acustice se poate aplica teoria propagării undelor elastice prin secțiuni variabile, fiind luat în considerare cazul vibrațiilor neadaptate, în care ecuația undei are următoarea expresie [LUC 07]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} (\ln S_x) - c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0 \quad (3.19)$$

în care:  $\Phi$  – potențialul vitezei;

$S_x$  – aria suprafeței barei la distanța  $x$  de origine;

$c$  – viteza de propagare a undelor acustice prin materialul din care se confecționează bara.

Este evident că ecuația undelor va lua forme diferite în raport cu modul de variație a secțiunii barei în lungul acesteia: liniară, în trepte, exponențială, catenoidală, parabolă și combinații ale formelor menționate anterior.

În cazul unei bare cu secțiunea longitudinală de variație exponențială, cazul cel mai des întâlnit în practică, aria secțiunii barei la distanța  $x$ , va fi  $S_x$ , de forma [AMZ 06]:

$$S_x = S_0 e^{-\alpha x} \quad (3.20)$$

în care:  $\alpha$  – coeficient ce caracterizează modul de variație a secțiunii.

Ecuația (3.19) devine:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \alpha \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (3.21)$$

Se consideră soluția generală a ecuației (3.21) ca fiind de forma:

$$\Phi(t, x) = C e^{j(\omega t + \alpha x)} \quad (3.22)$$

în care:  $C$  – este o substanță.

Înlocuind pe  $\Phi$  și derivatele acesteia se va obține soluția generală a ecuației (3.21) [LUC 07]:

$$\Phi(t, x) = e^{\frac{\alpha}{2} x} \left( A e^{-jx \sqrt{k^2 - \alpha^2 / 4}} + B e^{-jx \sqrt{k^2 - \alpha^2 / 4}} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (3.23)$$

în care:  $k = \omega / c$  ;

A și B sunt două constante ce pot fi determinate punând condițiile la limită.

Din relația (3.23) se constată că în bară există două unde: o undă care se propagă de la bază spre vârf numită undă progresivă și o undă care se propagă de la vârf spre bază numită undă regresivă.

Dacă se cunoaște potențialul de viteze  $\Phi$ , atunci se poate determina expresia presiunii acustice  $p_x$  într-un punct aflat la distanța  $x$ , de origine, cu expresia de forma [AMZ 06]:

$$p_x = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -j\rho\omega e^{\frac{\alpha}{2}x} \left( A e^{-j\frac{\omega}{c}x} + B e^{-j\frac{\omega}{c}x} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (3.24)$$

Expresia vitezei particulei  $v_x$ , poate fi determinată în același fel cu aceeași formulă:

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = e^{\frac{\alpha}{2}x} \left[ A \left( \frac{\alpha}{2} - j\frac{\omega}{c} \right) e^{-j\frac{\omega}{c}x} + B \left( \frac{\alpha}{2} - j\frac{\omega}{c} \right) e^{-j\frac{\omega}{c}x} \right] \quad (3.25)$$

în care:  $c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \alpha^2 c^2 / 4\omega^2}}$  ;

$\rho$  – densitatea materialului din care este confecționată bara.

Pentru utilizarea transformatoarelor acustice este necesară cunoașterea vitezei particulei la secțiunea inițială  $S_0$  și finală  $S_f$ . Se pun condițiile:

$$x = 0 \rightarrow v_0 = \left[ A \left( \frac{\alpha}{2} - j\frac{\omega}{c} \right) + B \left( \frac{\alpha}{2} + j\frac{\omega}{c} \right) \right] e^{j\omega t} \quad (3.26)$$

$$x = L \rightarrow v_L = e^{\frac{\alpha}{2}L} \left[ A \left( \frac{\alpha}{2} - j\frac{\omega}{c} \right) + B \left( \frac{\alpha}{2} + j\frac{\omega}{c} \right) \cdot e^{j\frac{\omega}{c}L} \right] e^{j\omega t} \quad (3.27)$$

În majoritatea cazurilor este de preferat ca lungimea  $L$  a transformatorului să fie egală cu un număr întreg de jumătăți de lungime de undă, însemnând [LUC 07] [AMZ 06]:

$$L = n \frac{\lambda'}{2} = \frac{nc'}{2f} \quad (3.28)$$

O mărime importantă care caracterizează transformatorul acustic este factorul de amplificare  $N$ , definit de raportul dintre viteza particulei la intrare ( $v_0$ ) și la ieșire ( $v_L$ ) [LUC 07]:

$$N = \frac{v_L}{v_0} = (-1)^n \cdot e^{\frac{\alpha}{2}L} = \sqrt{\frac{S_0}{S_f}} \quad (3.29)$$

Dacă se cunoaște factorul de amplificare se poate determina coeficientul de variație a secțiunii  $\alpha$  cu relația:

$$\alpha = \frac{2 \ln N}{L} \quad (3.30)$$

Elementul cel mai important al transformatorului rămâne totuși lungimea  $L$  asupra căreia trebuie aplicate anumite corecții funcție de modul de variație al secțiunii și de modul în care elementele sunt conectate între ele. În concluzie, combinând relațiile (3.27), (3.29) și (3.30) se poate determina lungimea transformatorului acustic cu următoarea expresie:

$$L = \frac{nc}{2f_c} \cdot \sqrt{1 + (\ln N / n\pi)^2} \quad (3.31)$$

în care:

$f_c$  – frecvența de calcul, în Hz;

$c$  – viteza de propagare a undelor longitudinale în materialul din care este confecționată bara, în cm/s;

$n$  – număr întreg.

Un alt parametru important pentru calculul mișcării sistemului, dar și pentru concentrator îl reprezintă cunoașterea planelor nodale, necesare pentru fixarea întregului sistem pe instalația din care face parte. Pentru a determina poziția planelor nodale se impune anularea vitezei  $v_x = 0$  și vom obține pentru relația (3.25) următoarele [LUC 07]:

$$(A + B) \left[ \frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\omega}{c}x\right) - \frac{\omega}{c} \sin\left(\frac{\omega}{c}x\right) \right] = 0 \quad (3.32)$$

Aceste rezultate se traduc în:

$$x_{nodal} = \frac{c'}{\omega} \arctg\left(\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{c'}{\omega} + n'\pi\right) \quad (3.33)$$

Luând în considerare că  $L$  este un număr întreg de jumătăți de lungime de undă, expresia (3.33) devine:

$$x_{nodal} = \frac{L}{n\pi} \arctg\left(\frac{1}{n\pi} \ln N + n'\pi\right) \quad (3.34)$$

în care:  $n'$  – număr întreg;  $n' = 0$  pentru primul nod și  $n' = 1$  pentru nodul 2 și așa mai departe.

În tabelul 3.6. sunt date valorile pentru factorul de amplificare  $N$  pentru câteva tipuri de secțiuni, iar în anexa A3 sunt indicați parametri pentru câteva tipuri de transformatoare acustice.

Pe lângă aceste componente principale prezentate anterior, ansamblul ultrasonic mai conține și alte componente precum:

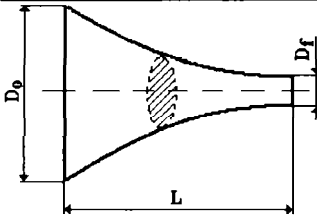
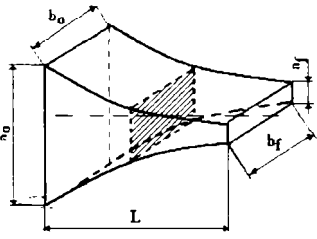
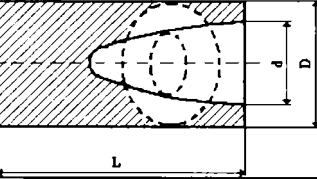
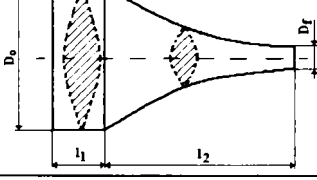
**Sistemul de răcire al ansamblului ultrasonic** - atât în cazul transductorului magnetostrictiv cât și în cazul transductorului electrostrictiv. Pentru asigurarea integrității ansamblului ultrasonic se impune răcirea continuă a acestuia. Asigurarea răcirii ansamblului ultrasonic este o condiție esențială și indispensabilă pentru bună funcționare a standului.

Sistemul de răcire este format de obicei din ventilatoare electrice și are rolul de a asigura, în timpul funcționării răcirea componentelor generatorului de înaltă frecvență și a transductorului.

**Elementele de fixare mecanică și izolare acustică** - fac o legătură eficientă între instalația acustică și structura de rezistență a echipamentului respectiv, urmărind totodată realizarea unei izolații acustice eficiente între cele două părți.

Aceste elemente permit transmiterea energiei acustice spre suprafața de lucru, oprind transmiterea ei spre instalație. Din considerente energetice (eliminarea pierderilor) și de stabilitate dinamică, sistemul mecano-acustic trebuie montat într-un nod de oscilație.

**Tabelul 3.6.** Valoarea factorului de amplificare  $N$  pentru diferite secțiuni [LUC 07]

Nr. crt.	Forma secțiunii și tipul concentratorului	Factorul de amplificare $N$	Observații
1.		$N = \frac{D_0}{D_f}$	Suprafață cilindrică, exponențială
2.		$N = \sqrt{\frac{a_0 b_0}{a_f b_f}}$	Suprafață rectangulară, exponențială
3.		$N = \frac{D}{\sqrt{D^2 - d^2}}$	Suprafață circulară, exponențială
4.		$N = \left  N \frac{\cos Kl_1}{\cos Kl_2} \right $ $K = \frac{\omega}{c}$ $l_3 = 0$	Suprafață circulară, exponențială

### 3.3. Elemente de concepție și realizare a componentelor ansamblului ultrasonic folosind programe software specializate

#### 3.3.1. Generalități

Pentru a realiza elemente de tip booster sau sonotrode care să rezoneze la frecvența de rezonanță stabilită se utilizează relațiile de calcul prezentate în anexa A3 sau nomograme pentru determinarea dimensiunilor limită și este nevoie să parcurgem procedura prezentată în continuare:

**Selectarea frecvenței de lucru.** Frecvența de lucru este dictată de aplicația pe care dorim să o realizăm, dar și de frecvența generatorului de ultrasunete disponibil. Cea mai joasă frecvență utilizată este, de regulă, 20kHz. La această frecvență, transferul energetic și eficiența activării sunt optime. Utilizarea frecvențelor superioare celei de 20kHz sunt impuse de aplicație și respectiv de dimensiunile ansamblului ultrasonic. De exemplu, în cazul activării curgerii materialelor polimerice în stare de topitură cu ultrasunete, se folosește un echipament de 35-40kHz; aceasta din motive de imposibilitate de adaptare a gabariturii ansamblului ultrasonic la 20kHz în procesele de punere în formă a materialelor polimerice (injectare sau extrudare).

**Alegerea materialului sonotrodei sau booster-ului.** Materialele folosite la construcția sonotrodei sau a booster-ului trebuie să prezinte rezistență înaltă la oboseală și pierderi acustice reduse. Aliajele de aluminiu de înaltă rezistență și titan sunt ideale. Multe alte materiale pot fi folosite dar cu riscul unor pierderi ridicate de putere. De asemenea, este de menționat că aplicația poate dicta tipul de material folosit la realizarea elementelor ansamblului ultrasonic.

**Determinarea vitezei de propagare a sunetului.** În cazul în care nu se cunoaște viteza de propagare a sunetului în materialul ales pentru construcția elementelor ansamblului ultrasonic, aceasta poate fi determinată prin folosirea unor aparate speciale. Determinarea cu precizie a vitezei de propagare a sunetului în materialul ales conduce la obținerea cât mai precisă a dimensiunilor finale ale sonotrodei-booster-ului ce lucrează la frecvența de rezonanță dorită și totodată se scurtează timpul de obținere a acestora.

**Alegerea coeficientului teoretic de amplificare.** Coeficientul teoretic de amplificare al amplitudinii oscilațiilor ultrasonice  $N$  are valori diferite în funcție de forma concentratorului adaptor de undă și depinde de raportul secțiunilor diametrelor (secțiunilor) dintre suprafața radiantă a transductorului și suprafața terminală a concentratorului.

Valorile teoretice sunt redată în tabelul 3.5 și în anexa A3, dar cele reale diferă cu cât valoarea lui  $N$  este mai mare. Aceste diferențe sunt destul de greu de evaluat, dar fabricanții de echipamente ultrasonice au date precise bazate pe numeroase evaluări experimentale, dar ele se transmit cu multe rezerve în circuitul public.

**Realizarea prototipului, acorduri și teste.** Elementele ansamblului ultrasonic se prelucrează pe mașini cu comandă numerică sau pe echipamente clasice. În urma prelucrării se obțin formele și dimensiunile acestor elemente urmând ca acestea să fie testate-calibrate în vederea aducerii la frecvența de rezonanță. Testarea se realizează cu aparatură specifică, de regulă alcătuită dintr-un generator de semnal și un osciloscop. Calibrarea este procesul de îndepărtare

treptată de material până când elementul ultrasonic este adus la frecvența de rezonanță.

### 3.3.2. Medii virtuale pentru modelarea elementelor ansamblului ultrasonic

Calculul vitezei sunetului, a frecvenței de rezonanță și a dimensiunilor de acordare ale unui sistem acustic ultrasonic este o problemă complexă bazată pe rezolvarea ecuațiilor diferențiale de transmitere în mediul activat. Un calculator specializat al parametrilor componentelor ultrasonice este cel dezvoltat de cei de la Powerultrasonics (figura 3.18.). Modul de lucru constă în parcurgerea următoarelor etape: alegerea modului de analizare (acesta oferă date despre viteza sunetului), calculul lungimii de undă și al frecvenței pentru unele forme simple pentru materiale de uz comun cum ar fi oțelul, titanul și alumiuniul.

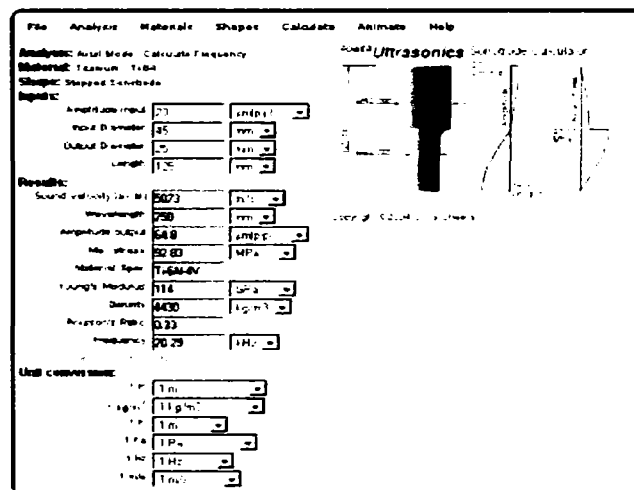


Figura 3.18. Calculator al parametrilor sonotrodelor ultrasonice de putere [POW 01]

Softul este capabil să rezolve problema după direcții monoaxiale, poate calcula viteza sunetului, frecvența de rezonanță și dimensiunile părților tunate pentru o anumită rată a componentelor ultrasonice de putere.

Un alt soft este dezvoltat de cei de la Krell Engineering care este mult mai elaborat și pe lângă datele furnizate de calculatorul online prezentat anterior, oferă date complete cu privire la elementele de caracterizare a ansamblului ultrasonic (factor de amplificare, zona de amplasare a nodului de oscilație, factorul de calitate, dimensiunile teoretice ale componentelor calibrate), generează grafice de variație a solicitărilor din material și a pierderilor pe unitatea de lungime, pe unitatea de volum, pierderilor cumulate. Interfața de lucru a acestui program este prezentată în figura 3.19.

Modul de lucru cu ajutorul softului prezentat constă în parcurgerea următoarelor etape:

- introducerea datelor în program (date cu privire la tipul rezonatorului ce dorim să-l construim, date privind modul de realizare a calibrării, date referitoare la parametri de caracterizare a rezonatorului etc.);

- stabilirea echipamentului ce va fi folosit pentru activare (se specifică date privind frecvența de rezonanță a generatorului folosit, date privind puterea de lucru etc.);
- se stabilește materialul folosit pentru construcția rezonatorului ultrasonic (materialul poate fi ales din baza de date a programului sau se poate folosi un material nou, în această situație este necesară cunoașterea și introducerea datelor de caracterizare a materialului);
- se introduc fomez rezonatorului;
- se selectează suprafața la nivelul căreia se face calibrare și se execută comanda de calibrare la frecvența de rezonanță.

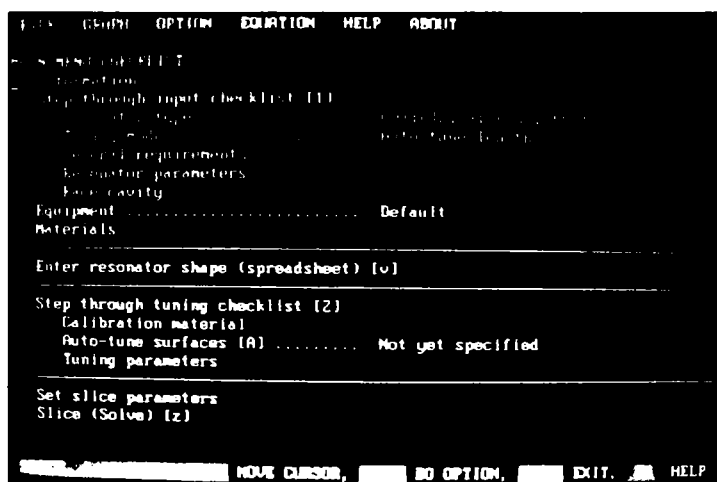


Figura 3.19. Soft specializat de modelare a formelor elementelor ansamblului ultrasonic

În urma rulării programului se obțin formele teoretice ale rezonatorului ultrasonic calibrate la frecvența de rezonanță. De asemenea, se obțin date cu privire la:

- factorul de amplificare al rezonatorului ultrasonic;
- factorul de calitate;
- amplasarea nodului de oscilație;
- diagramele de variație a amplitudinii pe toată lungimea rezonatorului;
- graficele solicitărilor interne din material;
- graficele pierderilor (pe unitatea de lungime, volum și cumulate) etc.

Modelarea cu ajutorul programelor software rulate pe calculator prezintă avantajul eliminării calculelor laborioase necesare obținerii formelor și dimensiunilor teoretice ale elementelor ansamblului ultrasonic. De asemenea, aceste programe generează pe baza valorilor introduse și forma vizuală a elementelor ansamblului ultrasonic.

### 3.4. Efectele ultrasunetelor asupra topiturii polimerice

Ultrasunetele se utilizează pentru o mare varietate de aplicații. Vom împărți acestea în două mari categorii funcție de putere:

- ultrasunete de joasă putere;
- ultrasunete de înaltă putere.



În funcție de aplicație, ultrasunetele de mare putere pot avea diferite efecte (uneori chiar efecte nedorite) într-un proces, deci este important să înțelegem ce efecte sunt posibile și de ce se produc. Efectele posibile sunt:

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

Pe durata unor fracțiuni ale ciclului de oscilație, în timpul activării ultrasonice, viteza sculei poate să depășească viteza de deplasare a mediului activat. La suprafața de separare, vibrația determină o deplasare infinitezimală (de ordinul micrometrilor), dar suficientă pentru a determina separarea suprafețelor prin înmuierea sau topirea asperităților sau prin ruperea grefării macromoleculilor 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 reținere a topiturii, datorită reversării sensului vectorului frecare, reducerii coeficientului de frecare și anulării componentei ce se opune mișcării pe interfața de contact a materialului plastifiat cu suprafața laterală a concentratorului. Rezultatul este modificarea distribuției de viteză de curgere a fluidului în sensul creșterii debitului volumic prin provocarea alunecării la perete [STA 03].

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

### 3.4.2. Înmuierea acustică

În timpul propagării ultrasunetelor în medii solide, metalice, acestea interacționează activ cu materialul ce îl traversează. Ca urmare, se produc tensiuni acustice și deformații elasto-plastice, se induc în material componente de tensiune tangențială suficient de mari pentru a dezancora dizlocațiile din pozițiile lor blocate de obstacole și se favorizează deplasarea lor în 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), energia ultraacustică având aceleași efecte de reducere a tensiunii statice de deformare ca și energia termică [STA 03].

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

În cazul unui polimer semicristalin bifazic ( $T_v < T < T_{cu}$ ) este de așteptat o creștere a temperaturii materialului amorf intercristalin ca zonă preferențială de conversie a energiei unde în energie termică, fapt ce determină creșterea mobilității lanțurilor macromoleculare de material amorf prin favorizarea relaxării acestora și reducerea vâscozității aparente pe fondul tensiunilor tangențiale induse.

Ținând seama de natura și structura materialului polimeric solid, în cazuri extreme este posibilă chiar ruperea macromoleculii datorită sollicitării ciclice la care este supusă, fragmentarea zonală a lanțului polimeric și implicit transformarea polimerului într-unul cu masa moleculară mai redusă și proprietăți de curgere mai bune.

Prin oricare din cele două variante ipotetice prezentate anterior se reduce tensiunea superficială la limita de separare a fazelor lichid - solid (cristalit), de reținut

fiind faptul că la puteri de activare ridicate materialul polimeric poate suferi modificări de structură și comportamentale importante datorită rușerilor lanțurilor macromoleculare [STA 03].

### **3.4.3. Absorbția energiei undei ultrasonice și transformarea în energie termică**

Energia înaltă a vibrațiilor mecanice poate fi foarte ușor convertită în căldură, fie prin frecare la interfața dintre diferite părți, fie prin frecare internă între materiale. Efectul poate fi, de asemenea, o limitare – vorbim de puterea "pierdută" cauzată de energia ce a fost convertită în căldură între transductor, booster și sonotrodă și la interfața dintre acestea.

Volumul topiturii supus activării ultrasonice este constituit dintr-o multitudine de macromolecule întrepătrunse între care apar, inerent, constrângeri reciproce de mobilitate care determină 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.

Absorbția energiei ultrasonice depinde, de asemenea, de conductivitatea termică a mediului în care se propagă unda. Conform teoriei Kirckhoff, are loc un schimb de căldură între porțiuni de compresie și de destindere din undă, fapt ce duce la micșorarea energiei undei.

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 ultrasonică.

### **3.4.4. Efectul ultrasonic termo-pelicular**

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 undă). 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.

Activarea ultrasonică, prin efectul termo-acustic indus la nivelul suprafeței laterale de contact cu fluidul sub presiune ( $p = 600\div 1200$  bari), provoacă formarea unui strat fin de material supraîncalzit, 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, favorizează desprinderea topiturii de perete astfel încât se înregistrează o majorare de debit 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 este oportună desemnarea acestei sinergii, cu efect direct asupra proprietăților reologice aparente ale fluidului, sub numele de "*efect ultrasonic termo-pelicular*" [STA 03].

Grosimea stratului de material afectat este funcție de proprietățile fluidului, de capacitatea acestuia de a atenua oscilația undei ultrasonice.

Rezultatele experimentale [STA 03] dovedesc o creștere importantă a temperaturii în vecinătatea vârfului convertorului ultrasonic și formarea unei pelicule lubrifiante în vecinătatea peretelui acestuia.

Literatura de specialitate menționează și alte efecte posibile aplicării ultrasunetelor în procese industriale, dar ținând seama de condițiile specifice de lucru:

- presiune ridicată;
- materialul supus activării este degazat, uscat;
- timpul de expunere este scurt, topitura tranzitează zona activată într-un timp relativ scurt, de ordinul secundelor.

În cazul activării ultrasonice a proceselor de sudare-topire, injectare/extrudare, sau formare prin presare a polimerilor este puțin probabilă manifestarea următoarelor efecte ale ultrasunetelor:

- **Cavitația** (figura 3.20.), pentru că presupune o tranziție de fază lichid/gaz, starea gazoasă fiind imposibil de obținut pentru materiale polimerice industriale. Este certă însă prezența în volumul de material polimeric a unei cantități infime de apă (pentru materiale cu proprietăți higroscopice). Aceasta ar putea amorsa cavitația în anumite condiții particulare de operare.

În cazul procedeeleor de punere în formă a materialelor polimerice:

- conținutul de apă al topiturii activate ultrasonic este infim (în cazul materialelor higroscopice granulele se usucă în cuptor electric timp de 4-8 ore înainte de utilizare), iar în cilindrul mașinii de injectare are loc evaporarea apei remanente și eliminarea ei din topitură;
- presiunea materialului plastifiat este mare (50 ÷ 1500 bari).

Ținând 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;

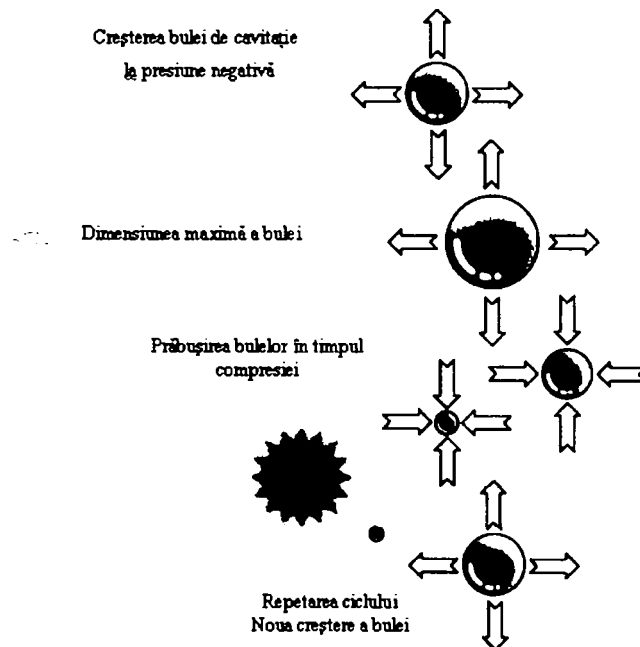


Figura 3.20. Cavitația și implozia [CHE 01]

- **Polimerizarea.** 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 prezentă apa. Disocierea moleculei de apă datorată cavității acustice produce radicalii liberi care amorsează polimerizarea. Notabil este faptul că, pentru a obține efectul de polimerizare, timpii de expunere 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 cel mult 1 ÷ 2 secunde.
- **Depolimerizarea.** La iradierea cu ultrasunete timp mai îndelungat, 1 ÷ 6 ore a unei soluții de nitroceluloză, 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 cu ajutorul ultrasunetelor un rol important îi revine fenomenului de cavitație acustică, stabilindu-se că într-un lichid complet degazat sau sub presiune acest proces de degradare este împiedicat sau mult diminuat.
- **Dispersia ultrasonică** apare pentru că 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 procedeelelor de punere în formă a materialelor polimerice.

### 3.5. Limitările procesului ultrasonic

Cele mai importante limitări sunt date de materialele componentelor. Pe lângă tipul materialului, alte limitări sunt date de dimensiunile componentelor, puterea sistemelor ultrasonice lungimea de undă, amplitudinea etc.

**Dimensiunile.** Elementele de tip booster și sonotrodele sunt limitate în mărime de constrângeri fizice bazate pe lungimea de undă a ultrasunetelor utilizate, respectiv raportul secțiunilor.

**Lungimea de undă.** Lungimea de undă este dependentă de frecvența de operare și de viteza sunetului prin materialul sonotrodei sau booster-ului.

**Puterea.** Majoritatea sistemelor ultrasonice folosesc sisteme de control pentru a regla automat puterea de intrare așa cum o cere procesul, dar evident în interiorul capacității generatorului și transductorului. Transductorul este cel care dictează puterea maximă ce o poate menține sistemul. În unele cazuri este posibil să compensăm limitarea de putere prin creșterea timpului de lucru, dar este posibil ca acest lucru să nu funcționeze în unele cazuri.

**Amplitudinea.** Creșterea amplitudinii constă în creșterea energiei de activare, existând posibilitatea de a suprasolicita generatorul sau sonotroda. Solicitarea este proporțională cu amplitudinea și ruperea prin oboseală este întotdeauna un pericol.

Creșterea amplitudinii în raport cu valoarea optimă are drept consecință o încălzire apreciabilă a materialului plastic aflat în contact cu sonotroda, fapt care poate duce la distrugerea materialului, la apariția de cratere de descompunere în materialul topit.

Reducerea amplitudinii sub valoarea optimă are drept efect scăderea cantității de material prelevată prin activare cu ultrasunete.

### 3.6. Posibilități de aplicare a ultrasunetelor în tehnică

Prelucrarea dimensională cu energie electroultraacustică își găsește în tehnica modernă un câmp de aplicabilitate din ce în ce mai larg, remarcându-se în mod deosebit în prelucrarea materialelor dure și fragile neelectroconductoare, acolo unde alte procedee de prelucrare nu dau rezultate satisfacatoare sau sunt imposibil de aplicat.

Cu rezultate deosebite se aplică prelucrarea dimensională cu ultrasunete în aeronautică, în industria constructoare de mașini, în ceasornicărie și elemente de mecanică fină, în industria aparatelor medicale și de cercetare etc.

Câteva dintre domeniile în care se aplică cu succes ultrasunetele sunt:

- Industrie:
  - procesarea materialelor polimerice cu ultrasunete (injectarea, extrudarea, injectarea-suflarea, termoformarea);
  - sudare în câmp ultrasonic;
  - eroziune electrică în câmp ultrasonic;
  - așchieră în câmp ultrasonic (operații de strunjire, burghiere, filetare, debitare etc.);
  - curățirea în câmp ultrasonic;
  - uscarea în câmp ultrasonic;
  - motoare ultrasonice;
- Medicină:
  - diagnosticare cu ultrasunete;
  - terapie și chirurgie cu ultrasunete;
- Chimie – obținerea de sonogeluri pentru diferite aplicații.

Dintre aplicațiile amintite, importanță pentru cercetarea propusă în cadrul tezei prezintă aplicațiile ultrasunetelor în procesarea materialelor polimerice, în special efectele ultrasunetelor în activarea curgerii materialelor polimerice în procesele de extrudare-injectare.

### 3.7. Concluzii

Cercetările teoretice și experimentale care au vizat undele ultrasonice au urmărit de-a lungul timpului mai multe direcții. Pentru început, cercetătorii în domeniu au procedat la definirea și clasificarea undelor acustice după diverse criterii. Pentru cercetarea propusă prin prezenta teză de doctorat interesează undele ultrasonore cu frecvențe cuprinse între  $16000-10^{10}$  Hz.

Undele ultrasonice sunt caracterizate de o serie de mărimi acustice, deosebit de importante, pentru că de valorile lor trebuie să se țină seama în orice proces tehnologic care implică folosirea undelor ultrasonore.

Construcția sistemelor ultraacustice reprezintă unul dintre cele mai importante puncte de interes ale cercetărilor din domeniu, cu implicații directe în aplicațiile specifice pentru care au fost proiectate acestea. Astfel, sistemele ultraacustice trebuie să îndeplinească o serie de cerințe, atât din punct de vedere tehnologic cât și din punct de vedere ultraacustic.

Din ansamblul componentelor care intră în alcătuirea sistemelor ultraacustice, doar unul este unic pentru fiecare proces tehnologic: sonotroda. În cele mai multe cazuri aceasta joacă și rolul de sculă activă în procesul tehnologic.

Un factor deosebit de important în ceea ce privește performanțele sistemelor ultraacustice îl reprezintă materialele folosite la construcția lor. Din acest punct de

vedere, studiile efectuate până în prezent sunt departe de a fi epuizate, căutându-se mereu noi materiale cu proprietăți cât mai satisfăcătoare pentru eficientizarea componentelor sistemelor ultraacustice.

Cercetările prezente și cele viitoare s-au dovedit a fi din ce în ce mai focusate pe realizarea de programe software specializate care să facă posibilă concepția, proiectarea și realizarea ansamblurilor ultrasonice, în scopul îmbunătățirii performanțelor de realizare a acestora, cu impact direct asupra creșterii calității și productivității lor.

Posibilitățile de aplicație a undelor ultrasonore sunt vaste, acestea nefiind epuizate, iar din acest punct de vedere prelucrarea materialelor polimerice cu ultrasunete reprezintă un succes, cu continue perspective de evoluție.

# CAPITOLUL IV

## STADIUL ACTUAL PRIVIND UTILIZAREA ULTRASUNETELOR ÎN PROCESELE DE CURGERE A MATERIALELOR POLIMERICE

### 4.1. Generalități

Necesitățile unei societăți moderne stimulează dezvoltarea intensivă de materiale plastice, consacându-le în multe ramuri ale activității umane și generând prin aceasta noi activități directe sau indirecte legate de producerea și gestionarea acestora precum și activități de cercetare privind **tehnologii cât mai perfecționate** de producere a acestor materiale.

Dezvoltarea rapidă a industriei construcțiilor de mașini, a electronicii, electrotehnicii, mecanicii fine, opticii, a industriei aeronautice etc., s-a produs și pe baza punerii la punct și utilizării pe scară tot mai largă a tehnicilor de prelucrare cu ultrasunete [MAR 86].

Numeroasele aplicații ale ultrasunetelor în diverse ramuri ale tehnicii se datorează efectelor produse de acestea ca urmare a proprietăților pe care le posedă undele ultrasonore:

- lungimea de undă mică;
- accelerația particulei foarte mare putând atinge  $10^9$  ori accelerația gravitațională;
- posibilitatea de direcționare a unui fascicul ultrasonic îngust în direcția dorită;
- posibilitatea de concentrare și focalizare a energiei într-un spațiu limitat fără să afecteze mediul prin care se propagă.

Analizarea efectelor de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice în stare de topitură au la bază procedeele clasice de extrudare și injectare a materialelor plastice.

### 4.2. Stadiul actual al cunoașterii pe plan internațional

Se poate afirma cu certitudine ca nu exista domeniu al vieții economice și sociale în care ultrasunetele sa nu-si fi găsit aplicabilitate.

În plan internațional, numărul cercetătorilor ce prezintă preocupări în domeniul activării cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice este destul de mare și este greu să îi numim pe toți aceștia. Câțiva dintre cercetătorii ce au manifestat preocupări în domeniul utilizării ultrasunetelor în procesele de activare a curgerii materialelor polimerice în stare de topitură amintim pe Sahnoune et al, Prince G.J. și West P.J (1996), Wang et al (2001), Chen G. et al, Cao Y. and Li H. (2002), Guo S. et al, Oh J.S. et al (2003), Li J. et al, Ibar J.P. (2004), Jiang L.I. et al, Nagasaka M. et al, Li Y. et al, Wu H. et al (2005), Qin X. et al, Chen Y et al, Li J et al (2006), Peng B. et al, Bulychev N. et al (2007) etc.



Studiile efectului ultrasunetelor asupra PS extrudat printr-o filieră canelată au indicat o scădere a vâscozității aparente cu 29% și o scădere a presiunii în filieră cu 22% comparativ cu situația în care nu s-au aplicat ultrasunete. Vâscozitatea topiturii descrește exponențial pe măsură ce intensitatea ultrasunetelor crește. Vibrațiile ultrasonice au mai condus, de asemenea, la o amânare a riscului de fracturare a topiturii și la scurtarea timpului de relaxare lanțurilor moleculare ale PS [CHE 06].

O serie de cercetări au indicat că temperatura și presiunea depind de puterea ultrasonică și de volumul specific în cazul materialului polistiren (PS) studiat la temperaturi cuprinse între 50 și 280 °C și la presiuni de până la 775 bari. Temperatura de tranziție sticloasă volumică s-a constatat că variază liniar cu presiunea. Mai mult, aceasta coincide cu temperatura la care viteza sunetului indică o modificare pronunțată de la comportamentul de tip solid la cel de tip lichid [SAH 96].

Alte cercetări asupra PS au demonstrat că aplicarea de ultrasunete la intrarea materialului în filieră duce la deranjarea curgerii convergente a topiturii în zona de intrare în filieră și la modificarea tiparului de curgere, ceea ce determină o rezistență la tracțiune mai redusă. Totodată, aplicarea ultrasunetelor activează lanțurile moleculare astfel încât forțele de rezistență la tracțiune se refac repede. Iradierea cu ultrasunete mărește volumul de curgere al PS și reduce încărcătura moleculară a topiturii de polimer. Toate aceste efecte ale ultrasunetelor duc la mărirea productivității și la îmbunătățirea calității produselor de extrudare [CHE07].

Cercetătorii Chen G., Guo S. și Li H. [CHE 02] de la Laboratorul Central de Stat de Ingineria Materialelor Polimerice din China au studiat efectul oscilațiilor ultrasonice asupra presiunii din filieră, vâscozității topiturii și curgerii oscilatorii a topiturii de polistiren (PS) și au constatat că acestea scad în prezența ultrasunetelor. În schimb, are loc creșterea productivității extrudării. Introducerea oscilațiilor ultrasonice în topitura de PS îmbunătățește foarte mult procesabilitatea polistirenului. Rezultatele experimentale au arătat că în prezența ultrasunetelor are loc inhibarea sau chiar dispariția defectelor de suprafață la extrudatul de PS. Suprafața extrudatului de PS este foarte mult îmbunătățită. Vâscozitatea topiturii de PS scade deoarece crește indicele său de putere în prezența oscilațiilor ultrasonice.

Efectul oscilațiilor ultrasonice asupra presiunii din filieră, productivității la extrudare, vâscozității topiturii și posibilității de fracturare a topiturii a fost studiat pentru LLDPE, observându-se că în condițiile expunerii la ultrasunete are loc inhibarea sau dispariția fracturării topiturii sau defectelor de suprafață. Proprietățile de suprafață ale LLDPE au fost considerabil îmbunătățite în prezența ultrasunetelor. Oscilațiile ultrasonice au determinat creșterea semnificativă a productivității extrudatului de LLDPE, iar presiunea în filieră, vâscozitatea topiturii și energia de activare a curgerii au scăzut odată cu creșterea indicelui de putere [GUO 03].

Rezultatele experimentale au evidențiat faptul că oscilațiile ultrasonice îmbunătățesc vâscozitatea de forfecare precum și energia de activare a curgerii pentru LLDPE (polietilena de joasă densitate lineară). Totodată, are loc creșterea greutatei moleculare a LLDPE, iar polidispersia moleculară descrește în prezența oscilațiilor ultrasonice. S-a constatat în cazul amestecului de LLDPE și LDPE (polietilena de joasă densitate) că oscilațiile ultrasonice pot îmbunătăți timpul caracteristic al mixturii, iar energia de activare a curgerii scade în prezența oscilațiilor ultrasonice [WUH 05].

Efectul frecvenței vibrațiilor și amplitudinii vibrațiilor asupra microstructurii și proprietăților mecanice ale HDPE au fost studiate la trecerea printr-un extruder electromagnetic de plastifiere dinamică și s-au studiat proprietățile mecanice,



caracterizate prin rezistența la tracțiune și forța de impact, pe direcția de curgere și perpendicular pe aceasta. Rezultatele testelor au arătat că mai ales perpendicular pe direcția de curgere are loc o îmbunătățire a rezistenței la curgere și a rezistenței la impact. Analizele au demonstrat că extrudatul supus vibrațiilor ultrasonice a avut o cristalinitate mai înaltă și legături inter-sferolitice mai puternice, ceea ce înseamnă și proprietăți mecanice mai bune în comparație cu extrudarea convențională [QIN 06].

Studiile privind efectul ultrasunetelor asupra degradării topiturii de HDPE au indicat că inițial, apare un proces de scindare randomizată a lanțurilor moleculare cu o distribuție largă a greutateilor moleculare, iar apoi un proces de scindare nerandomizată însoțit de o îngustare a distribuției greutateii moleculare. Cinetica de degradare a HDPE se supune ecuației  $M_t = m_{\infty} + A e^{-kt}$  [LI 05].

Cercetătorii Cao Y. și Li H. De [CAO 02] la Universitatea Sichuan din China au studiat efectul iradierii cu ultrasunete asupra procesării prin extrudare și comportamentului de cristalizare al PP. Rezultatele studiului au arătat că o intensitate corespunzătoare a iradierii cu ultrasunete determină o scădere importantă a presiunii din filieră și a vâscozității aparente, reduce expansiunea extrudatului la ieșirea din filieră și îmbunătățește calitatea aparentă a PP. Are loc modificarea structurii cristaline a PP. Sunt induse și unele efecte speciale de către ultrasunete, precum presiuni puternice, vibrații, dislocări, ceea ce alterează creșterea cristalelor de PP și pot favoriza transformări cristaline speciale ( $\alpha \rightarrow \beta$ ).

Folosind un extruder cu doi melci s-au preparat amestecuri cu concentrații variate de PP (polipropilenă) și cauciuc natural. Amestecurile obținute au fost trecute printr-un reactor unde au fost tratate cu ultrasunete într-un proces de extrudare. Au fost studiate proprietățile mecanice și reologice ale amestecurilor obținute precum și morfologia acestora cu ajutorul microscopiei electronice de scanare și microscopiei de forță atomică și s-a constatat că proprietățile mecanice ale amestecurilor tratate cu ultrasunete au fost semnificativ îmbunătățite față de ale celor netratate. În ceea ce privește vâscozitatea, nu s-au observat diferențe semnificative la amestecurile tratate ultrasonic față de cele netratate. Microscopia de forță atomică (AFM) a evidențiat apariția unor straturi interfaciale, ca și o aderare interfacială și o îmbunătățire a adeziunii interfaciale dintre PP și cauciucul natural în amestecurile supuse ultrasunetelor. În același timp s-a constatat o slabă aderare și o delaminare interfacială la amestecurile netratate cu ultrasunete. Îmbunătățirea adeziunii interfaciale și a proprietăților morfologice și mecanice s-a considerat că se datorează formării pe loc (în circuit) a unui copolimer la interfața dintre cei doi polimeri nemiscibili (PP și cauciuc natural) ca rezultat al tratamentului cu ultrasunete fără a se folosi alte substanțe chimice [OH 03].

Efectul degradării ultrasonice asupra cristalizării, proprietăților mecanice și comportamentului reologic al DP s-a studiat de către cercetători chinezi [PEN 07] și s-a observat că, prin comparație cu polipropilena izotactică (iPP), DP prezintă o cristalinitate inferioară și limită de curgere la tracțiune joasă, dar o alungire la rupere semnificativ mai mare. La iradierea ultrasonică, apare degradarea mecano-chimică la topitura de DP și are loc sciziunea randomizată a lanțului majoritar la mase moleculare mari, odată cu formarea de carbonil în structura macromoleculară. Segmentele de lanț cu masă moleculară relativă joasă rezultate în urma degradării ultrasonice pot să cristalizeze la temperaturi înalte datorită mobilității și polarității lor sporite. În plus, degradarea ultrasonică poate determina o reducere a rezistenței la tracțiune și a vâscozității aparente a DP.

Numeroase cercetări privind îmbunătățirea proprietăților mecanice ale amestecului de polietilenă (PE) și polistiren (PS) utilizând oscilațiile ultrasonice au

arătat că vâscozitatea aparentă a amestecului se reduce în mod remarcabil în prezența acestor unde, și astfel proprietățile mecanice ale mixturii se îmbunătățesc. Dimensiunile particulelor fazei dispersate ale amestecului se reduc, distribuția lor devine ordonată iar interacțiunea interfacială a amestecului devine tot mai puternică dacă acesta este extrudat în prezența oscilațiilor ultrasonice. Rezultatele obținute în urma folosirii spectrului UV și a extracției Soxhlet au indicat formarea unui copolimer de polietilenă-polistiren în timpul extrudării în prezența ultrasunetelor, ceea ce îmbunătățește compatibilitatea celor 2 materiale în mixtură [CHE 02].

Cercetătorul american Ibar J. P. A [IBA 04] a evidențiat că topiturile de polimer expuse vibrațiilor de joasă densitate prezintă o textură amorfă și semicristalină și orientări ale straturilor modificate. Studiile sale s-au referit la doi polimeri clasici, polistirenul (PS) și polipropilena (PP) și au arătat o scădere a vâscozității acestora la activarea de frecvență joasă precum și o îmbunătățire a performanțelor mecanice ale părților solidificate.

Studii efectuate asupra comportamentului la extrudare a polistirenului (PS), terpolimerului etilen-propilen-dienă (EPDM) și asupra amestecului acestora în raportul PS/EPDM 80/20 a indicat că în prezența ultrasunetelor procesabilitatea polimerilor studiați și amestecului acestora a fost îmbunătățită [Li 06].

Cercetătorii englezi de la Universitatea din Bath [PRI 96] au constatat studiind amestecuri de materiale precum polistiren+poli-cis-butadienă și polistiren+polimetil-fenil-silană că ultrasunetele de intensitate înaltă pot fi folosite la obținerea de copolimeri prin sonicarea amestecurilor de homopolimeri.

Alți cercetători [Li 04] au studiat degradarea ultrasonică a poliamidei 6 (PA6) din punct de vedere al influenței intensității ultrasunetelor, timpului de iradiere precum și distanței de iradiere ultrasonică. S-a constatat că la greutate moleculară joasă a PA6 (LPA6) are loc creșterea vâscozității medii în prezența oscilațiilor ultrasonice datorită reacției de extensie a grupărilor terminale  $-COOH$  și  $-NH_2$ , iar la HPA6 (PA6 cu greutate moleculară înaltă, de înaltă densitate) are loc o scădere a vâscozității odată cu micșorarea timpului de iradiere, atingând un minimum, după care se produce o creștere a vâscozității odată cu expunerea la iradierea ultrasonică, după care este atinsă o limită impusă de greutatea moleculară. Cinetica de degradare a topiturii de HPA6 se supune ecuației  $M_t = m \infty + Ae^{-kt}$ .

Studiul privind extrudarea ultrasonică a amestecului de polietilenă de înaltă densitate (HDPE) și poliamidă-6 (PA6) a arătat că iradierea ultrasonică duce la degradarea polimerilor și la o compatibilizare pe loc (în circuit) a amestecurilor confirmată de variațiile apărute în proprietățile vâscoelastice liniare. Rezultatele au indicat că efectul iradierii cu ultrasunete asupra proprietăților reologice dinamice depinde de compoziție și de temperatura experimentală. Datele obținute au indicat că iradierea ultrasonică poate descrește tensiunea interfacială și mărește compatibilitatea dintre HDPE/PA6 în amestec [JIA 05].

Un grup de cercetători de la Universitatea din Stuttgart în colaborare cu o serie de alți cercetători din Elveția, Germania și Rusia au arătat că efectul tratamentului cu ultrasunete asupra modificărilor de suprafață ale dioxidului de titan în cazul a diferiți polimeri în condiții de dispersie apoasă constă în reducerea dimensiunilor particulelor și creșterea eficienței de acoperire cu particule a copolimerilor și sporirea stabilității dispersiei [BUL 07].

Cercetătorii Wang O., Xia H. și Zhang C. de la Universitatea Sichuan din China [WAN 01] au folosit pentru prima dată polimerizarea emulsiilor încapsulate folosind ultrasunetele pentru a prepara compozite polimerice anorganice din nanoparticule. S-a studiat comportamentul câtorva nanoparticule anorganice ( $SiO_2$ ,

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) la iradierea cu ultrasunete, mai precis dispersarea, dezintegrarea și activarea. Stabilitatea dispersiei, morfologia și structura nanoparticulelor iradiate au fost stabilite prin metode precum microscopie de transmisie electronică (TEM), transformare în infraroșu Fourier (FTIR) și spectrofotometrie. Rezultatele au arătat că particulele anorganice în soluție apoasă se pot redispersa mult mai eficient când sunt iradiate ultrasonic decât la amestecarea convențională. Acest lucru stă la baza obținerii compozitelor polimerice anorganice din nanoparticule. Prin această tehnică se obține cu succes latexul care are o stabilitate timp îndelungat și care este constituit majoritar din nanoparticule polimerice anorganice. Analizele efectuate prin metodele enunțate au confirmat buna dispersare a nanoparticulelor care au fost încapsulate în polimerul rezultat, ce a avut o grosime extrem de mică, de 5-65 nm.

Un grup de cercetători japonezi de la Universitatea Yagamata din Japonia [NAG 05] au investigat proprietățile hidrogelurilor utilizând metoda eco-pulsului ultrasonic. Măsurătorile ultrasonice ale gelurilor au fost realizate la temperaturi de 20-70°C folosind unde ultrasonice de 10 Mhz. S-a constatat că viteza sunetului gelului descrește cu creșterea temperaturii și crește odată cu creșterea concentrației de polimer. A fost evident faptul că temperatura depinde de viteza sunetului.

Sunt cunoscute soluții tehnice de activare a curgerii polimerilor prin interstiții de dimensiuni reduse folosind activarea ultrasonică transversală a unor corpuri adaptoare de undă intermediare între convertorul ultrasonic și corpurile purtătoare a cavităților (Brevet JP 2001001370), respectiv placă mobilă purtătoare a cavităților (Brevet JP 2001062878). De asemenea, se cunosc soluțiile tehnice care presupun încorporarea ansamblului convertor de ultrasunete (transductor + concentrator adaptor de undă) în construcția matriței cu activare în vecinătatea zonei de injectare în cuiburi (cavități de formare) (Brevet JP2000271971).

În continuare se prezintă o scurtă descriere a acestor brevete de invenție.

Abstract of JP2001062878

PROBLEM TO BE SOLVED: To suppress the amplitude of ultrasonic waves transmitted in the radial direction of a cavity as small as possible. SOLUTION: In an ultrasonic injection mold for an optical disk having a movable side mold 4, a fixed side mold 3, the disk molding cavity 6 formed between the contact surfaces 3a, 4a of the movable and fixed side molds 4, 3, the stamper 15 arranged to the bottom part of the cavity 6 to form a pit to the surface of a disk and the ultrasonic generating means 7 attached to the mold side mold 4 or the fixed side mold generating means 7 attached to the fixed side mold 3 in order to apply ultrasonic waves to the cavity 6 at a time of injection molding, one or a plurality of slits 20 are formed on the circumference of a circle within the region L where in the direction crossing the diameter direction of the cavity 6. The slits 20 are prof. formed at places of  $n\lambda/4$  ( $n=1, 3, 5, \dots$ ) from an ultrasonic input part

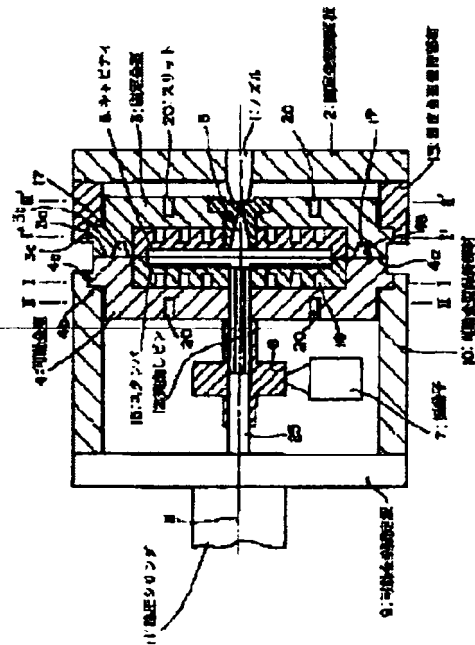


Figura 4.1. Injectarea cu ultrasunete a topiturii pentru discuri optice [BRE 01]

Soluția tehnică a brevetului, prezentată în figura 4.1., prevede o activare corectă din punct de vedere a funcționării în regim de rezonanță a convertorului ultrasonic astfel încât în cuibul matriței se realizează un sistem oscilant de tip placă, care este liber și nu se produce atenuarea vibrațiilor.

Soluția are limitări relativ la formele injectabile și chiar la dimensiuni deoarece placa trebuie să fie compatibilă dimensional cu frecvența ultrasunetelor utilizate.

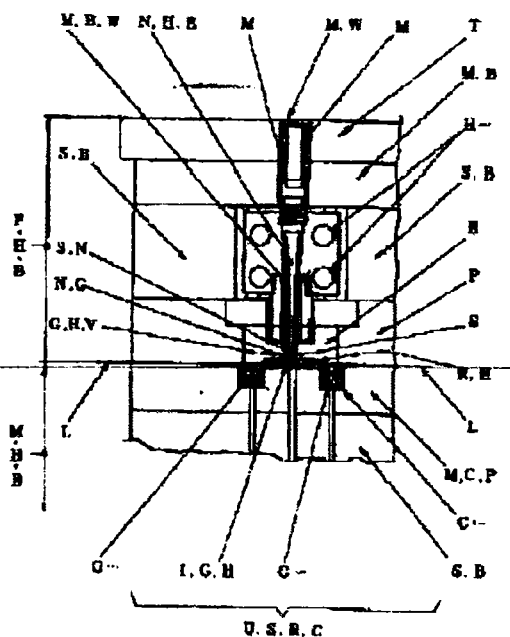
Soluția este aplicabilă cu eficiență maximă doar la piese de tip disc. Ansamblul mecanic este conceput pentru disipări minime de energie ultrasonică.

În figura 4.2. se prezintă varianta optimă de activare a cuiburilor unei matrițe cu canale calde în care ultrasunetele sunt introduse în vecinătatea punctului de injectare și a anticamerei prin capătul activ al unui concentrator adaptor de undă care este integrat în interiorul duzei.

Ansamblul convertor ultrasonic este fixat în zona nodală în interiorul distribuitorului încălzit și asigură o funcționare fără atenuări de energie ultrasonică. Data brevetării în Japonia este 2000.

#### Abstract of JP2000271971

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To achieve the reduction of equipment cost, the enhancement of the quality and productivity of a product, the saving of a space, the enhancement of safety, the beautification of work environment by the fundamental improvement of various problems related to the heating source in the vicinity of a needle valve in a hot runner type injection mold and the rationalization of molding work, the reduction of the loss of a resin raw material, the preparation of the periphery of a mold apparatus or the like. **SOLUTION:** In a hot runner type injection mold, a plurality of the cavities (C)... provided to movable side cavity plates (M, C, P) and the nozzle gates (N, G)... bored in the bushing (B) fixed to the plate (P) are allowed to communicate with each other and the temp. of the nozzle horn elements (N, H, E) provided to the nozzle gates (N, G)... In an orthogonally opposed contact state and leading end needle parts (S, N) are solved by the application of an ultrasonic energy source.



**Figura 4.2.** Matriță cu canale calde activată ultrasonic [BRE 02]

Din punct de vedere a modului de activare ultrasonică soluția prezentată în figura 4.3. este cea mai adecvată. În esență matrița se constituie de fapt pe structura constructivă și dimensiunile unui convertor ultrasonic cu corpuri adaptoare de undă în  $\lambda/2$  la îmbinarea cărora se materializează cuibul. Dimensiunile acestuia sunt limitate de dimensiunile de rezonanță a sistemului. Atenuările și pierderile sunt minime. Soluția poate prezenta un interes deosebit pentru microinjectare.

Abstract of JP2001001370

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide an ultrasonic injection mold capable of further enhancing a high transfer property, a low shrinkage factor and low double refraction only by applying simple improvement to the mold and enabling the injection molding of a large-sized molded article. **SOLUTION:** In an ultrasonic injection mold having a movable mold 4 and a fixed mold 3 between which a cavity is formed and the ultrasonic wave generation means 7 attached to the movable mold 4 or fixed mold 3 in order to apply ultrasonic waves to the cavity at a time of injection molding, notches 2C are formed to one places or a plurality of places of the movable mold 4 and the fixed mold 3 to provide thin-walled parts. Lateral vibration and/or radial vibration transmitted in the radial direction of the cavity may be generated from the ultrasonic generation means 7 other than vertical vibration.

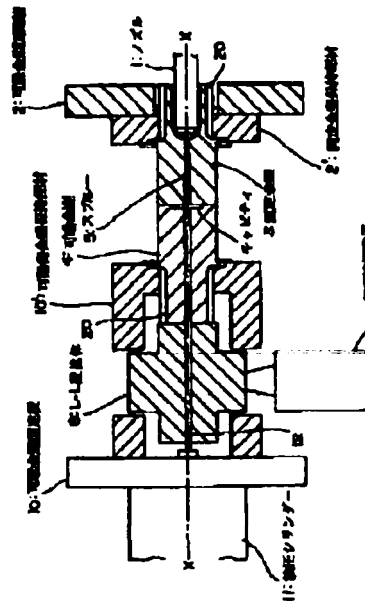


Figura 4.3. Procedeu de injectare cu activare ultrasonică [BRE 03]

Există și un program de cercetare-dezvoltare european, *ULTRAMELT* 2003-2006, asupra aplicării energiei ultrasonice în procedeele de injectare și extrudare. Matrița de injectare dezvoltată în cadrul programului *ULTRAMELT* este prezentată în figura 4.4.

Activarea ultrasonică se face pe canalul central de injectare fiind de așteptat astfel o eficacitate mai redusă la nivelul cuiburilor [CEE 06].

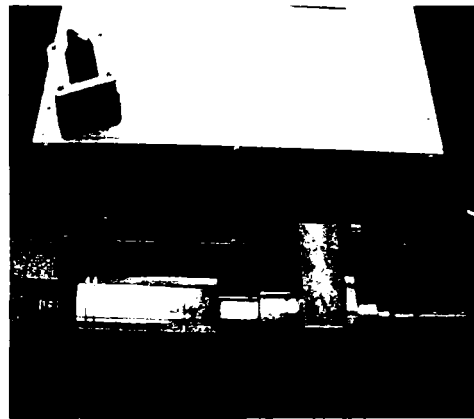
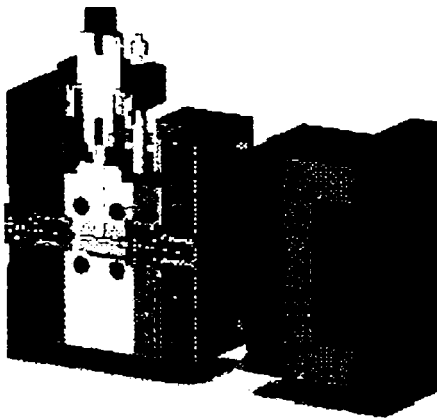


Figura 4.4. Matriță de injectare activată cu ultrasunete [ULT 03]

### 4.3. Stadiul actual al cunoașterii pe plan național

În plan național, dintre cercetătorii ce au manifestat preocupări în domeniul utilizării ultrasunetelor în diverse domenii de activitate amintim pe Bădăraș E și

Grumăzescu M (1967), Savii G. și Iclănzan T.A. (1973), Marinescu N.I. (1986), Cleșiu S.R. (1987 -1989), Amza G. (1988), Stan. D. (1999), Voloșencu C. (2002).

Dintre cei menționați anterior, preocupări în domeniul activării cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice în stare de topitură au manifestat doar Iclănzan T.A și Stan D. ambii desfășurându-și activitatea în cadrul Universității Politehnica din Timișoara, la Catedra de T.C.M.. Activitățile de cercetare în domeniu s-au materializat print-o o serie lucrări științifice de o deosebită valoare în domeniu, cărți și respectiv brevete de invenție, brevete premiate la saloanele internaționale.

Iclănzan T. și Stan D. de la Universitatea "Politehnica" din Timișoara [STA 03] [ICL 05] au stabilit că se poate produce un efect particular al activării cu ultrasunete, numit efect *ultrasonic termo-pelicular* care apare în condiții particulare de activare ale mediilor vascoelastice sub presiune. Efectul se caracterizează prin apariția unui strat fin de topitură supraîncălzită cu efect lubrifiant pe partea laterală a sonotrodei ultrasonice. Acest efect are mare importanță în fabricarea plasticelor, dar are și câteva aplicații particulare în injectarea și extrudarea polimerilor.

În baza efectului ultrasonic termo-pelicular este posibilă o activare ultrasonică a procesului de *injectare* a materialului polimeric în vecinătatea orificiului de intrare în cuib (punct de injectare al duzei finale de injecție) sau în secțiunea de ieșire din filiera de *extrudare* astfel încât, în această zonă restrânsă să se realizeze o concentrare de energie ultrasonice [STA 03].

Procedeele de extrudare a materialelor polimerice activate cu ultrasunete este caracterizat prin uniformizarea temperaturilor, a proprietăților de curgere a materialului plastifiat extrudat, majorarea semnificativă a debitului maxim admisibil, eliminarea sau reducerea apariției defectelor specifice extrudării. S-a dovedit că în cazul activării materialelor polimerice cu energie electroultraacustică, debitul de material extrudat crește cu până la 200% [ICL 03].

În cadrul proceselor de injectare a materialelor polimerice folosind o matriță cu canale calde activată cu ultrasunete efectele obținute sunt de reducere a forțelor de frecare la nivelul suprafeței de contact dintre material și sonotrodă, de ameliorare a proprietăților de curgere, de compensare a pierderilor termice în zona finală a traseului de injectare etc. [ICL 03].

Cercetările experimentale realizate în scopul punerii în evidență a efectului activării ultrasonice asupra debitului extrudat pentru diferite materiale polimerice analizate, polietilena de joasă densitate (PEJD), polietilena de înaltă densitate (HDPE) și polipropilena (PP), au pus 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 manifestării fenomenului de alunecare.

#### **4.3.1. Extrudarea materialelor polimerice activate cu ultrasunete**

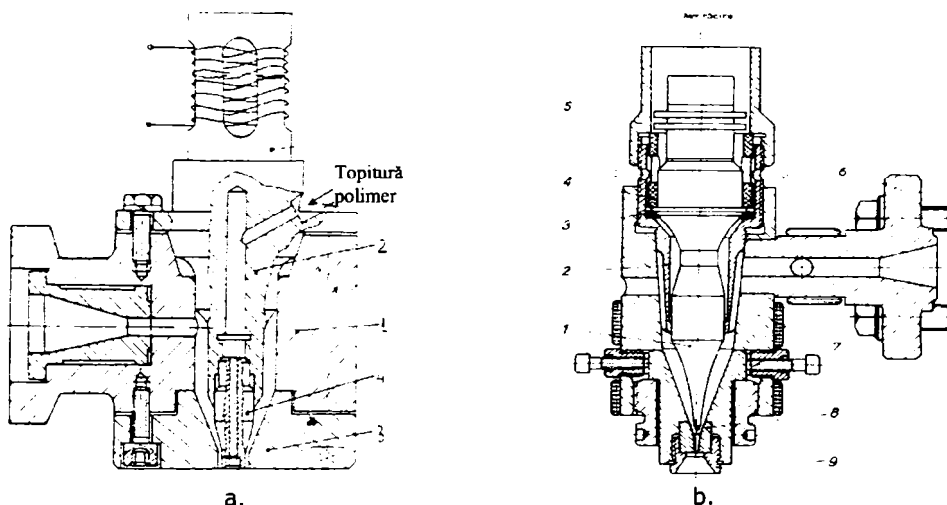
În vederea utilizării ultrasunetelor în aplicații industriale de extrudare a materialelor polimerice termoplastice au fost propuse câteva soluții ce sunt prezentate în figura 4.5. [ICL 03, 05, 08].

Un interes deosebit în ceea ce privește posibilele aplicații ale activării ultrasonice la extrudare ar putea fi manifestat de capul de extrudare cu element central reglabil utilizat la extrudarea profilată sau în procedeele de extrudare-sufare. Înlocuirea elementului central al unui astfel de dispozitiv de extrudare cu concentratorul unui ansamblu ultrasonic (figura 4.5.a), special proiectat pentru integrarea sa în ansamblul capului de extrudare, permite exploatarea efectului termo-



pelicular de suprafață, în scopul ameliorării performanțelor capetelor de extrudare prin îmbunătățirea proprietăților de curgere 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, astfel încât să se poată încorpora, la nivelul zonei nodale de flanșă, un concentrator adaptor de undă (2) adecvat construit. La capătul concentratorului adaptor de undă, se găsește montat prin înșurubare un vârf interschimbabil (4) al cărui capăt realizează împreună cu duza calibrată de extrudare (3), interstițiul adecvat procesului de extrudare. Soluția tehnică prezentată ameliorează semnificativ calitatea produselor realizate și productivitatea procedurii de extrudare [ICL 03, 05, 08].

În figura 4.5.b se prezintă o altă soluție de utilizare a ultrasunetelor aplicabilă la procesarea materialelor polimerice prin extrudare.



**Figura 4.5.** Dispozitive ultrasonice folosite la extrudarea polimerilor termoplastici [ICL 01, 03]

În figura 4.5.b se prezintă soluția unui cap de extrudare cu activare ultrasonică folosit la extrudarea materialelor polimerice topite la care elementul activ al ansamblului ultrasonic este de tipul transductor piezoceramic.

Soluțiile de extrudare descrise anterior prezintă următoarele posibile avantaje:

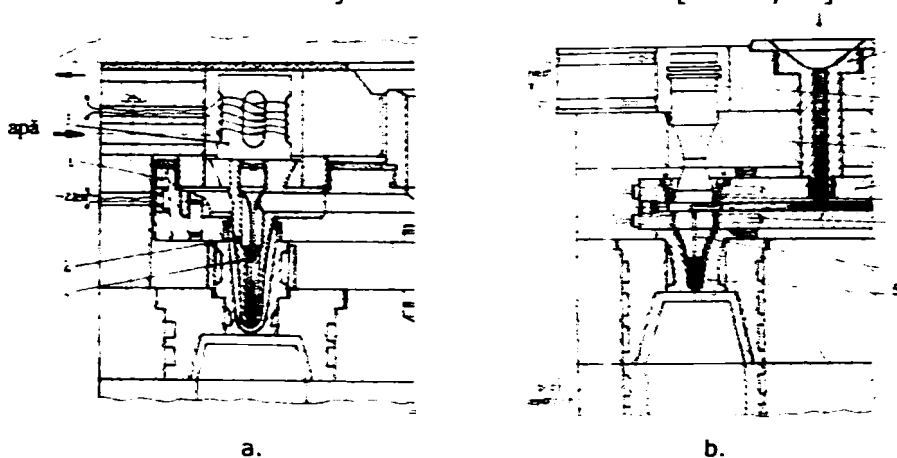
- înlăturarea dezavantajelor distribuției neuniforme a câmpului termic în secțiunea de ieșire a duzei de extrudare prin posibilitatea de reglaj continuu, precis, a nivelului activării ultrasonice;
- majorarea semnificativă a debitului maxim admisibil la extrudare prin întârzierea apariției defectelor specifice extrudării;
- asigurarea, la o construcție simplă și fiabilă, a posibilității de reglaj fin, continuu, a nivelului energiei ultrasonice și deci de control adecvat al activării procesului de extrudare.

#### **4.3.2. Matrițarea prin injectare a materialelor polimerice activate cu ultrasunete**

În cazul unei matrițe de injectare cu canale calde elementul central al duzelor finale este substituit cu partea terminală a unui concentrator adaptor de undă ce asigură activarea ultrasonică a materialului plastic în faza curgerii lui spre cuib. La

capătul concentratorului se produce o intensă concentrare de energie ultrasonică care se transmite materialului plastifiat alimentat prin blocul central de distribuție, realizându-se o zonă de materializare a efectului termopelicular de suprafață.

O astfel de matriță de injectare cu canale calde și activare ultrasonică (figura 4.6.a) poate fi realizată din adaptarea unui distribuitor central (1) de construcție clasică pentru a încorpora, la nivelul zonei nodale de flanșă, un concentrator adaptor de undă (2) al 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 împreună cu corpul concentratorului duză, interstițiul adecvat procesului de injectare. La capătul 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 duză se realizează un puternic efect de volum și unul de suprafață specifice emisiei ultrasonice, cu efecte favorabile procesului de injectare prin reducerea semnificativă a incidenței defectelor de extrudare [ICL 01, 03].



**Figura 4.6.** Matrițe de injectare cu canale calde și activare ultrasonică [ICL 01, 03] [CEE 06]

În figura 4.6.b se prezintă o invenție (cerere Bv nr.00793/2006) ce se referă la un concept inventiv de matrițe cu canale calde pentru injectarea materialelor polimerice și compozite termoplaste la care, pentru îmbunătățirea condițiilor de injectare în cuiburi și pentru ameliorarea calității, se folosește un convertor ultrasonic format dintr-un transductor și concentratoare adaptoare de undă plasate în dreptul cuiburilor astfel încât capătul activ al concentratorului de undă să genereze, în imediata vecinătate a anticamerei de injectare, un puternic efect termopelicular asupra materialului injectat ce parcurge canalul central al concentratorului adaptor de undă și un efect termic în vecinătatea suprafeței exterioare a concentratorului, învecinată cu anticamera (5) și cu orificiul de injectare în cuibul matriței. Rezultatul este o semnificativă scădere a vâscozității aparente, o puternică încălzire locală a materialului injectat în zona adiacentă duzei finale de injectare și implicit o reducere a consumului energetic, o scurtare a ciclului de injectare și o ameliorare a calității pieselor injectate [CEE 06].

În cazul matrițelor de injectare acestea asigură:

- modificări ale proprietăților reologice ale fluidului;



- bilanț termic de ansamblu al matriței îmbunătățit deoarece scăderea temperaturii topiturii în vecinătatea cuibului poate fi compensată prin efectul termic al activării ultrasonice;
- la o construcție simplă și fiabilă, posibilități de reglare fină, în timpul exploatarei matriței, a nivelului energiei ultrasonice debitate și deci de control facil a comportamentului reologic al topiturii și, respectiv, a procesului de umplere a matriței de injectare.

#### 4.4. Concluzii

Rezultatele obținute de către cercetatori de talie mondială [CHE 02, 06], [GUO 03], [CAO 02], [Li 06], [BRE 01], [BRE 02], [BRE 03], [ULT 01] și națională [STA 03, 06, 07, 08], [ICL 01, 03, 05, 08] susțin propunerea de aplicare a activării ultrasonice în procesele ce implică curgerea topiturilor de polimer, (injectare respectiv extrudare).

Activarea ultrasonică poate fi de un real folos în aplicațiile industriale care presupun procesarea sau utilizarea unui fluid vâscos prin îmbunătățirea performanțelor procedeeleor ca urmare a manifestării efectului ultrasonic termo-pelicular de suprafață [ICL 01, 02, 03].

Implementarea în cadrul procedeeleor clasice (injectarea, extrudarea) de realizare a produselor din materiale plastice a tehnicilor de activare cu energie electroultraacustică în procesarea de materiale polimerice a condus la obținerea de noi tehnologii îmbunătățite de procesare a materialelor polimerice și deci de noi direcții de cercetare în domeniul procesării materialelor polimerice.

S-a observat că la extrudarea materialului PS vâscozitatea topiturii descrește exponențial pe măsură ce intensitatea ultrasunetelor crește. S-a indicat o scădere a vâscozității aparente cu 29% și o scădere a presiunii în filieră cu 22% comparativ cu situația în care nu s-au aplicat ultrasunete.

Oscilațiile ultrasonice au determinat creșterea semnificativă a productivității extrudatului de PS, LLDPE și PP, iar presiunea în filieră, vâscozitatea topiturii și energia de activare a curgerii au scăzut.

Prezența ultrasunetelor în procesele de curgere conduce la inhibarea sau chiar dispariția defectelor de suprafață la extrudatul de PS și LLDPE. Suprafața extrudatului este foarte mult îmbunătățită.

Activarea cu ultrasunete asupra debitului extrudat pentru LDPE, HDPE și PP au pus 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 manifestării fenomenului de alunecare.

De asemenea, analizele au demonstrat că extrudatul de HDPE supus vibrațiilor ultrasonice a avut o cristalinitate mai înaltă și legături inter-sferolitice mai puternice, ceea ce înseamnă și proprietăți mecanice mai bune în comparație cu extrudarea convențională.

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 ultrasonică drept un mijloc de ameliorare și/sau control al proprietăților de curgere și a productivității pentru procedeele de punere în formă.

Efectele activării ultrasonice pot fi folosite în scopul:

- îmbunătățirii procesului de curgere a polimerilor topiți;
- corectării unor deficiențe funcționale ale dispozitivelor;
- îmbunătățirii calității produselor extrudate;

- controlului temperaturii în zona învecinată extremității concentratorului (prin reglarea intensității activării ultrasonice);
- modificării parametrilor 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.

# CAPITOLUL V

## OBIECTIVELE CERCETĂRII

### 5.1. Obiectivele cercetării

Aplicațiile tehnice ale ultrasunetelor de frecvențe joase (20 ÷ 100kHz) și puteri mari (100 ÷ 500W) sunt numeroase și au în vedere, în general, prelucrarea materialelor. În ciuda unor progrese evidente în realizarea sistemelor tehnologice cu ultrasunete activarea proceselor de curgere a materialelor polimerice a fost mult timp relativ modestă și neconvingătoare.

Potențialul de ameliorare a unor tehnici de mare productivitate cum sunt injectarea sau extrudarea materialelor polimerice au determinat noi abordări în cercetare în pragul anului 2000, în ciuda dificultăților legate de studiul interacțiunii ultrasunetelor cu procese în care materialele au o comportare reologică. Astfel, începând cu anul 1966 se remarcă cercetări de pionierat cu rezultate interesante la Universitatea "POLITEHICA" din Timișoara [Stan, Iclănzan], cercetări ce identifică și propun explicația unui nou efect al ultrasunetelor și anume "*efectul ultrasonic termopelicular*".

În preajma anilor 2000 se identifică pe plan mondial apariția soluțiilor tehnice de aplicare industrială a activării ultrasonice cu precădere în injectarea materialelor polimerice susținute de o serie de brevete de invenție, în special în Japonia [BRE 01], [BRE 02], [BRE 03], [BRE 04].

Consemnarea interesului mediului industrial pentru această tehnică de activare este marcată de programul european ULTRAMELT care, se desfășoară cu suportul financiar al Comunității Europene și a unui consorțiu de asociații patronale și firme de specialitate în perioada 2003 – 2006 [www.ultramelt.org].

În perioada 2006 – 2008 se realizează la ISIM și UPT, Timișoara în cadrul unor granturi de cercetare studii teoretice și experimentale privind adaptarea echipamentelor ultrasonice și tehnologiilor de aplicare în activarea ultrasonică a injectării [Grant CNCSIS tip TD 182/2007], [CEEX 265/2006].

Datorită efectului ultrasonic termopelicular generat de activarea ultrasonică a proceselor de curgere a polimerilor topiți se prefigurează importante ameliorări ale productivității și calității în următoarele aplicații:

- injectarea pieselor tehnice de precizie și cu pereți subțiri;
- injectarea de piese nanocompozite;
- injectarea pieselor optice;
- injectarea pieselor cu aplicații biologice.

Chiar dacă avantajele activării ultrasonice sunt evidente, modul în care activarea se face asupra proceselor, modul în care dispozitivele ultrasonice funcționând în regim de rezonanță se adaptează la un sistem constructiv în modul în care se obține un raport efecte/costuri de valoare maximă rămâne o problemă cu puține răspunsuri constituind încă patrimoniul exclusiv și deseori confidențial al aplicatorului.

În contextul de mai sus, obiectivul principal al prezentei teze de doctorat îl constituie **cercetarea teoretică și experimentală a efectelor activării cu ultrasunete (creștere de debit și ameliorare a calității extrudatului) în**

**procesele de curgere a materialelor polimerice** folosind echipamente ultrasonice de tip industrial (generator + ansamblu convertor ultrasonic), echipament de injectare de tip industrial și dispozitive de adaptare, respectiv facilități (softuri de aplicație dedicate) care să permită integrarea eficientă a celor de mai sus în definirea unei tehnologii aplicabile. Consecutiv definirii obiectivului general de cercetare în condițiile de mai sus decurg următoarele obiective derivate (secundare) care au fost urmărite în cercetările din prezenta teză:

1. Evaluarea sintetică și analitică a cercetărilor realizate pe plan mondial ținând cont de specificitatea comportării reologice a materialelor polimerice și specificitatea funcționării în regim de rezonanță a ansamblului ultrasonic activator.
2. Realizarea unui stand experimental folosindu-se echipamente de tip industrial.
3. Adaptarea constructiv-funcțională a generatorului de ultrasunete.
4. Adaptarea constructivă și funcțională a comportamentelor active ale ansamblului ultrasonic (transductor, concentrator adaptor de undă și dispozitiv de activare) la proces și standul experimental.
5. Realizarea unui set reprezentativ de încercări experimentale pe materiale polimerice urmărindu-se indicatorii de productivitate și calitate.
6. Evaluarea rezultatelor și stabilirea unui set de măsuri tehnice pentru aplicare, respectiv a unor direcții ulterioare de cercetare.

De asemenea, rezultatele obținute în urma cercetărilor experimentale au ca scop stabilirea potențialului de extindere la scară industrială, a aplicației de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice, în stare de topitură, în procesele de formare prin extrudare și/sau injectare, ca procedeu de îmbunătățire a curgerii topitului de polimer, respectiv de ameliorare a defectelor ce pot apărea în urma procesării materialelor polimerice prin extrudare-injectare.

## 5.2. Infrastructura de cercetare

În vederea realizării cercetărilor privind cele menționate anterior s-au urmărit:

- realizarea unui stand experimental de construcție specială care să permită studierea comportamentului curgerii materialelor polimerice în stare de topitură în situația cu și fără activare cu ultrasunete, în procesele de curgere;
- stabilirea echipamentelor necesare interpretării rezultatelor cercetării cu privire la:
  - cantitatea de material extrudat în condițiile curgerii cu și fără activare cu ultrasunete;
  - influența activării cu ultrasunete asupra calității suprafeței polimerului în procesele de curgere a materialelor polimerice;
  - influența activării cu ultrasunete asupra eventualelor modificări în structura internă a materialului polimeric în urma procesării.

În vederea realizării cercetărilor experimentale privind activarea cu ultrasunete a proceselor de curgere a materialelor polimerice s-a realizat un stand experimental de construcție specială. Dotările de care dispune acest stand experimental permite evidențierea efectelor ultrasonice ce se pot manifesta la nivelul curgerii materialelor polimerice în stare de topitură în procesele de punere în formă prin extrudare-injectare. Detaliile tehnice cu privire la construcția standului experimental sunt prezentate detaliat în cadrul capitolului VI, intitulat "*Cercetări experimentale privind construcția standului de activare cu ultrasunete a curgerii*"

*topiturii materialelor polimerice".*

În urma cercetărilor experimentale privind activarea cu ultrasunete a materialelor polimerice în stare de topitură, în vederea interpretării rezultatelor cercetării, s-a dispus și folosit următoarele tehnici și echipamente de investigare:

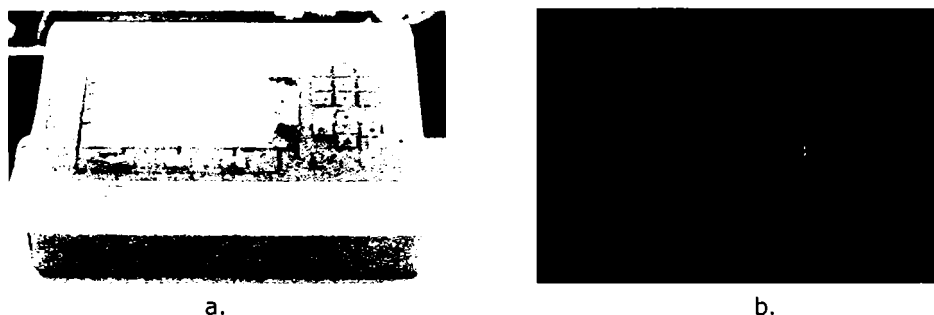
- cameră video de mare viteză;
- balanță electronică de precizie de 0,1g;
- programe software de interpretare a rezultatelor cercetării prin metoda celor mai mici pătrate;
- instalație DSC (Differential Scanning Calorimeter);
- instalație MFI (Melt Flow Index);
- Microscop optic Hirox cu mărire în gama de valori 250x ÷ 2500x.

### **5.3. Descrierea echipamentelor folosite în cadrul cercetării**

Se prezintă în continuare o parte din echipamentele și metodele folosite în cadrul cercetărilor experimentale privind studierea influenței activării cu ultrasunete în procesele de curgere prin extrudare-injectare a materialelor polimerice în stare de topitură.

#### **5.3.1. Echipamentul de determinare a impedanței și a frecvenței la rezonanță**

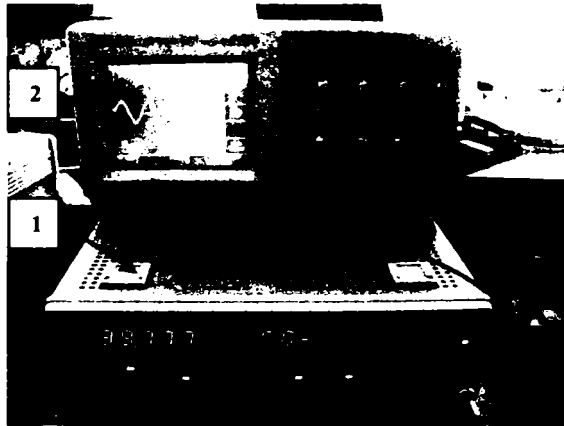
Echipamentul de determinare a impedanței și a frecvenței la rezonanță (figura 5.1.) este de construcție specială și are un rol foarte important în cadrul standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice. Acest echipament se folosește pentru a determina modul cum variază impedanța acustică și frecvența de rezonanță la trecerea polimerului în stare de topitură prin interstițiul creat între sonotrodă și pereții dispozitivului de curgere și instalarea a ansamblului ultrasonic.



**Figura 5.1. a.** Echipament de determinare a impedanței și frecvenței de rezonanță; **b.** Afîșajul echipamentului și zona de comandă

Datele obținute în urma măsurării sunt de un real folos prin faptul că determină frecvența de rezonanță în sarcină a ansamblului ultrasonic încastrat în dispozitivul ultrasonic în timpul operației de extrudare-injectare. Aceste date au permis reglarea frecvenței de rezonanță la generatorul ultrasonic, astfel încât să genereze frecvența obținută prin măsurare și ca urmare să existe siguranța că întotdeauna activarea cu ultrasunete a topiturii materialelor polimerice se realizează în cele mai bune condiții din punct de vedere al frecvenței de rezonanță.

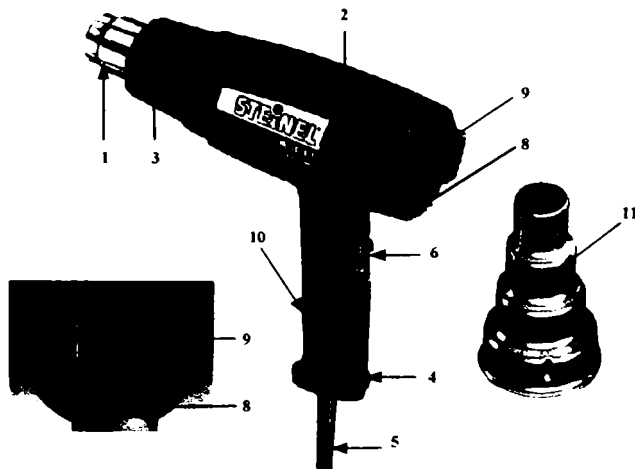
De asemenea, pentru măsurarea elementelor ansamblului ultrasonic în vederea aducerii la frecvența de rezonanță se mai folosește și standul experimental prezentat în figura 5.2. Acesta este alcătuit dintr-un generator de semnal cu funcții programabile HAMEG HM8130 (1) și un osciloscop Tectronix TDS2012 (2).



**Figura 5.2.** Stand experimental de testare și calibrarea a ansamblului ultrasonic:  
1 - generator de semnal; 2 - osciloscop

### 5.3.2. Echipament de încălzire a dispozitivului ansamblului ultrasonic

Întrucât dispozitivul ansamblului ultrasonic cât și ansamblul ultrasonic sunt reci este posibil ca la valori reduse ale temperaturii și presiunii de injectare-extrudare să se producă solidificarea polimerului în lungul interstițiului de curgere și apariția dopurilor de sigilare.



Tip generator	HL 2010 E		
Tensiunea de alimentare	230 - 240V, 50Hz		
Puterea	200W		
Treapta	1	2	3
Debit de aer	150	300	500 l/min
Temperatura	50°C / 50 - 630°C		
Reglarea temperaturii	Mai multe trepte în unități de 10°C prin taste		
Indicator de temperatură	Display LCD		
Clasa de protecție	II		
Protecție termică	da		

**Figura 5.3.** Generator de aer cald folosit la încălzirea dispozitivului ansamblului ultrasonic și a duzei de extrudare

Pentru a înlătura aceste inconveniente și pentru a aduce un aport de temperatură necesar realizării în bune condiții a cercetărilor se recurge la aducerea unui aport de temperatură la nivelul dispozitivului ultrasonic și la nivelul duzei de extrudare. Încălzirea și aducerea dispozitivului blocului ultrasonic la temperatura

dorită pentru fiecare tip de experiment se realizează cu ajutorul unui generator de aer cald, capabil să genereze temperaturi între 50 și 630°C. În figura 5.3. se prezintă generatorul de aer cald, respectiv datele tehnice ale acestuia.

Elementele ce intră în alcătuirea generatorului de aer cald folosit în cadrul experimentărilor sunt următoarele:

1. Tub de evacuare aer cald realizat din inox;
2. Admisie de aer cu plasă de reținere a corpurilor străine;
3. Țeava de protecție detașabilă (pentru locuri greu accesibile);
4. Suport pentru funcționare staționară, antibasculantă și antiderapantă;
5. Cablu rezistent cu manta din cauciuc;
6. Comutator în trepte pentru reglarea temperaturii (2 trepte/3 trepte);
7. Întrerupător pentru reglarea temperaturii;
8. Buton pentru reglarea temperaturii;
9. Indicator LCD pentru supravegherea temperaturii;
10. Mâner elastic detașabil;
11. Cap de concentrare aer cald.

Pe lângă reglarea turației/debitului de aer în trei trepte, temperatura poate fi reglată într-un interval de 50°C - 630°C prin intermediul butonului pentru reglare a temperaturii (8). Temperatura dorită poate fi ridicată sau coborâtă prin apăsarea părții "+" sau "-" a tastei de temperatură (8).

Pe treapta 1 a generatorului de aer cald temperatura este de 50°C. Trecerea de la temperatura treptei 1 la temperatura treptelor 2 sau 3 se realizează rapid. Pe timpul răcirii, pe indicatorul LCD (9) este afișată temperatura propriu-zisă la ieșirea din duză. Țeava de protecție (3), pentru locuri greu accesibile, poate fi demontată printr-un cuplaj tip baionetă, iar concentrarea debitului de aer cald se realizează prin amplasarea duzei 11 în zona de vârf a generatorului.

### 5.3.3. Echipamentul de monitorizare a temperaturii la nivelul duzei de extrudare și a dispozitivului ansamblului ultrasonic

Temperatura de procesare a polimerului este unul dintre factorii importanți ce urmează a fi analizați în cadrul experimentărilor, motiv pentru care este esențial ca pe tot parcursul procesului de extrudare-injectare, cu și fără ultrasunete, să se poată monitoriza temperatura atât la nivelul cilindrului extruderului cât și la nivelul dispozitivului blocului ultrasonic, dar și la nivelul duzei de extrudare.

Monitorizarea temperaturii în cilindrul extruderului este realizată în două zone cu ajutorul a două termocuple, iar la nivelul dispozitivului evaluarea temperaturii se realizează atât prin folosirea unor termocuple cât și cu laser.



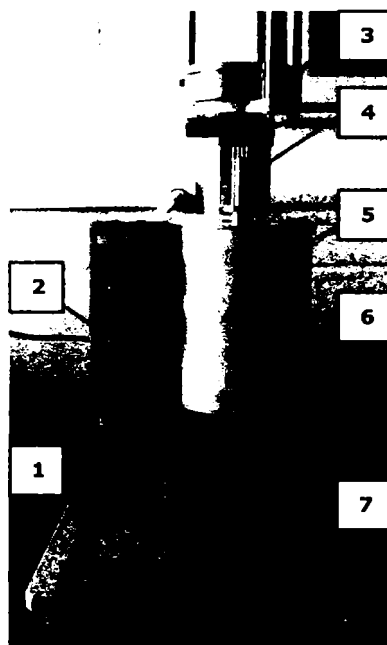
**Figura 5.4.** Echipament de monitorizare a temperaturii: **a** - la nivelul dispozitivului ultrasonic și **b** - la nivelul duzei de extrudare

Pentru a deține informații cu privire la modul cum variază temperatura în zona planului de extrudare a materialului în dispozitiv (figura 5.4.a) și la ieșire din acesta, în zona duzei de extrudare (figura 5.4.b), au fost realizate alezaje în care s-au montat elemente de tip senzori de temperatură conectați la un afișaj digital. De asemenea, temperatura poate fi măsurată folosind un echipament cu fascicul laser.

### 5.3.4. Echipamentul Melt Flow Index (MFI)

Echipamentul Melt Flow Index (MFI) este folosit în cadrul experimentărilor în vederea determinării comportamentului de curgere prin secțiuni finite a materialelor polimerice folosite în cadrul experimentelor. Echipamentul este prezentat în figura 5.5., iar în componența acestuia intră:

- carcasa echipamentului (1);
- unitatea de control a temperaturii cu afișaj LCD (2);
- greutatea de testare (3);
- piston (4);
- cuptor de încălzire (5);
- element de închidere a cilindrului (6);
- dispozitiv de tăiere (7).



**Figura 5.5.** Echipament experimental de caracterizare a curgerii materialelor polimerice  
– Melt Flow Index –

Metodele standard de testare a comportamentului de curgere a materialelor polimerice în stare de topitură sunt realizate cu respectarea normelor ISO de testare în domeniu. Metoda de testare variază funcție de caracteristicile materialului folosit așa cum se observă în tabelul 5.1.:

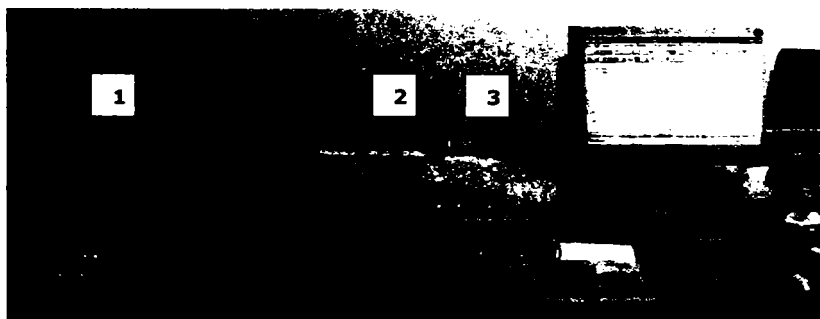


**Tabelul 5.1.** Condițiile tehnice de încercare a materialelor polimerice funcție de standardul ISO

Nr. Crt.	Standard	Polimer	Condiții codificate	Temperatura °C	Încărcarea Kg
1.	ISO 1622-1	PS	H	200	5,00
3.	ISO 1872-1	PE	E	190	0,325
4.	ISO 1872-1	PE	G	190	21,6
5.	ISO 1872-1	PE	T	190	5,00
6.	ISO 1873-1	PP	M	230	2,16
7.	ISO 2580-1	ABS	U	220	10,00
8.	ISO 2897-1	PS-I	H	200	5,00
9.	ISO 4613-1	E-VAC	B	150	2,16
10.	ISO 4613-1	E-VAC	D	190	2,16
11.	ISO 4613-1	E-VAC	Z	125	0,325
12.	ISO 4894-1	SAN	U	220	10,00
13.	ISO 6402-1	ASA	U	220	10,00
14.		ACS			
15.		AES			
16.	ISO 7391-1	PC	W	300	1,20
17.	ISO 8257-1	PMMA	N	230	3,80
18.	ISO 8986-1	PB	D	190	2,16

### 5.3.5. Calorimetrul diferențial DSC (Differential Scanning Calorimeter)

Analizorul DSC 204 *Phoenix* de la firma NETZSCH (figura 5.6.), ne permite să analizăm eventualele efecte ale activării cu ultrasunete asupra caracteristicilor polimerului cu privire la variația temperaturilor de tranziție ale polimerului.



**Figura 5.6.** Differential Scanning Calorimeter – DSC 204 Phoenix NETZSCH

În studiul materialelor polimerice, utilizarea calorimetrului diferențial (DSC) a devenit o unealtă de bază în determinarea relațiilor dintre proprietățile termice și structura moleculară, modul de procesare, morfologia și alte proprietăți ale acestor materiale.

În alcătuirea calorimetrului diferențial intră următoarele componente:

- unitate de măsură (1);
- unități de control a temperaturii și de programare a analizei (2);
- butelie de azot;
- calculator (3).

### 5.3.6. Microscopul optic HIROX, model KH – 1300

Microscopul optic Hirox KH1300, folosit pentru determinările experimentale (figura 5.7.) este dotat cu cameră foto și video de înaltă rezoluție (1600x1200 pixeli la 24 fps) și asigură un factor de mărire cu valori între 250x ÷ 2500x. Pentru a realiza transferul de imagini, microscopul este conectat la un calculator performant dotat cu ecran LCD. Comunicarea calculatorului cu microscopul optic este pusă pe seama programelor software dedicate aplicației.



**Figura 5.7.** Microscop optic HIROX KH – 1300 cu mărire cuprinsă între 250 ÷ 2500x

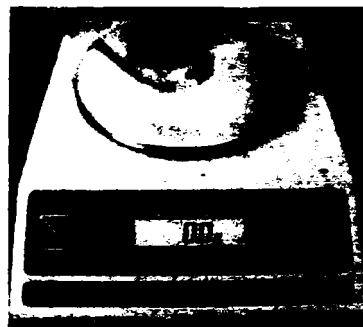
În alcătuirea microscopului digital intră următoarele componente:

1. stand - cu rol de menținere a camerei și lentilei;
2. cameră CCD de înaltă rezoluție, 2,11 mega pixel;
3. Selector factor de mărire;
4. lentilă adaptor;
5. bloc de comandă al microscopului;
6. monitor LCD conectat la un calculator performant.

### 5.3.7. Balanța electronică AveryBerkel

Balanța electronică (figura 5.8.) asigură o precizie de 0,1g și este folosită la determinarea cantității de material prelevat în urma încercărilor experimentale desfășurate în condiții de activare ultrasonică a topiturii materialelor polimerice în procesele de extrudare-injecrare, respectiv fără activare ultrasonică.

**Figura 5.8.** Balanță elctronică AveryBerkel de precizie 0,1g



# CAPITOLUL VI

## CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND CONSTRUCȚIA STANDULUI DE ACTIVARE CU ULTRASUNETE A CURGERII TOPITURII MATERIALELOR POLIMERICE

### 6.1. Generalități

În capitolul de față se tratează aspecte privind concepția și construcția elementelor ce intră în alcătuirea standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice.

Standul de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice este destinat dezvoltării inovative de noi tehnologii în domeniul procesării materialelor polimerice, scopul urmărit fiind de creștere a debitului de material extrudat, respectiv de ameliorare a calității extrudatului ca urmare procesării materialelor polimerice folosind metode clasice de extrudare și injectare.

Dezvoltarea de noi echipamente și tehnologii de activare cu ultrasunete are în vedere atât performanța procedeelor, privind reproductibilitatea calității activării curgerii materialelor polimerice cât și posibilitățile de automatizare a fabricației, control și monitorizare a proceselor tehnologice.

Construcția generală a standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice, prezentată în figura 6.1., a putut fi realizată prin combinarea următoarelor componente:

- sistem ultraacustic de activare a curgerii – alcătuit din generatorul de ultrasunete și ansamblul ultrasonic (transductor piezoceramic, amplificator intermediar de undă – booster și sonotrodă);
- dispozitivul de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic;
- echipament de procesare a materialelor polimerice (mașină de extrudare-injectare);

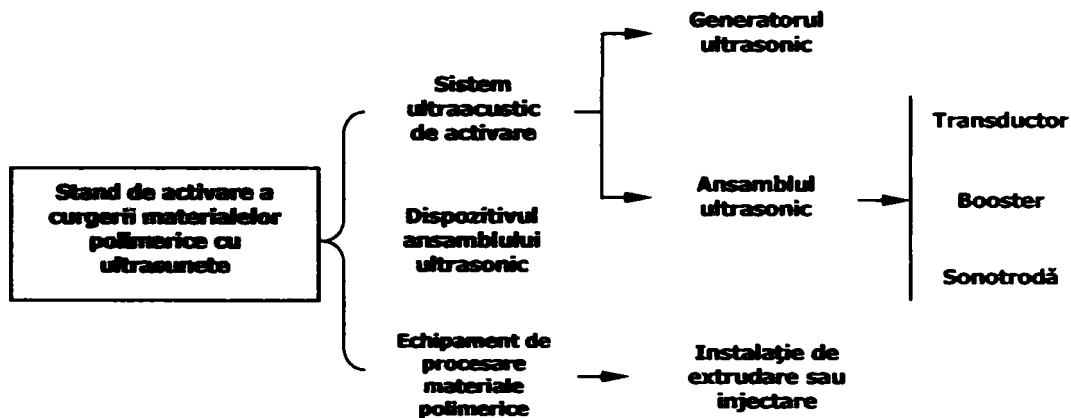
Pe lângă acestea, în alcătuirea standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice intră și echipamente auxiliare precum:

- echipament de încălzire a duzei și dispozitivului ansamblului ultrasonic;
- echipament de monitorizare a temperaturii la nivelul dispozitivului ansamblului ultrasonic și a duzei de extrudare.

În cadrul capitolului se realizează adaptarea constructivă și funcțională a sistemului ultrasonic și dispozitivului de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic pe un echipament de procesare a materialelor polimerice (echipament de extrudare-injectare), în vederea realizării standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice.

Sistemul ultraacustic de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice este montat pe instalația de extrudare, la ieșirea din aceasta a mediului polimeric în stare de topitură, având rolul de a aplica microvibrații asupra topiturii de polimer în scopul îmbunătățirii proprietăților și curgerii mediului polimeric

activat cu ultrasunete.

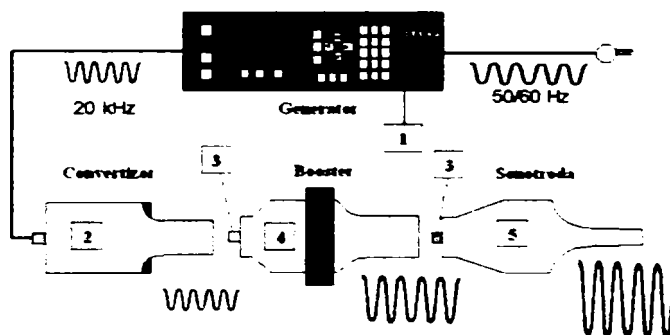


**Figura 6.1.** Construcția generală a standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice

## 6.2. Construcția sistemului ultraacustic de activare

Construcția generală a unui sistem ultraacustic (figura 6.2) are în componența sa generatorul de ultrasunete (1) și convertorul (ansamblul) ultrasonic alcătuit din:

- transductorul piezoceramic (2);
- elementele de cuplare - prezoane (3);
- concentrator adaptor de undă intermediar - booster (4);
- sonotroda (5).



**Figura 6.2.** Părțile componente principale ale sistemului ultraacustic [BRA 02]

Structura sistemului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice, pe lângă generatorul de ultrasunete și ansamblul rezonator mecanic (convertor piezoceramic, transformator de amplitudine, sonotroda de activare), mai include și dispozitivul de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic.

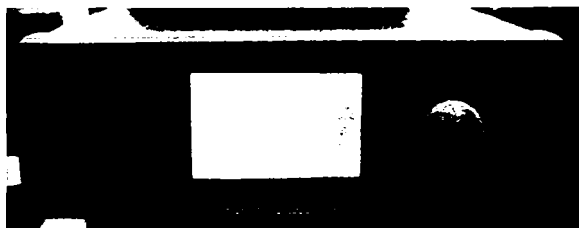
În cadrul cercetării de față se pune problema adaptării constructive și funcționale a sistemului ultrasonic ce va fi folosit în cadrul standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice.

Etapele necesare a fi parcurse în vederea construirii sistemului ultrasonic de activare sunt prezentate în continuare.

### 6.2.1. Construcția generatorului ultrasonic

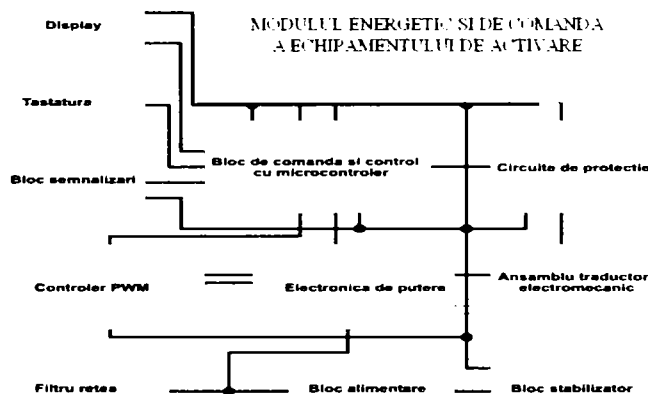
În vederea activării cu ultrasunete a curgerii topitului materialelor polimerice s-a construit la ISIM Timișoara, în cadrul colectivului din care fac parte, generatorul de ultrasunete prezentat în figura 6.3.

Generatorul ultrasonic construit lucrează la o putere de maxim 150W și este capabil să asigure funcționarea la o frecvență de rezonanță variabilă ce permite adaptarea și menținerea la rezonanță a ansamblului ultrasonic pe toată durata încercărilor experimentale.



**Figura 6.3.** Generatorul ultrasonic 40kHz, 150W

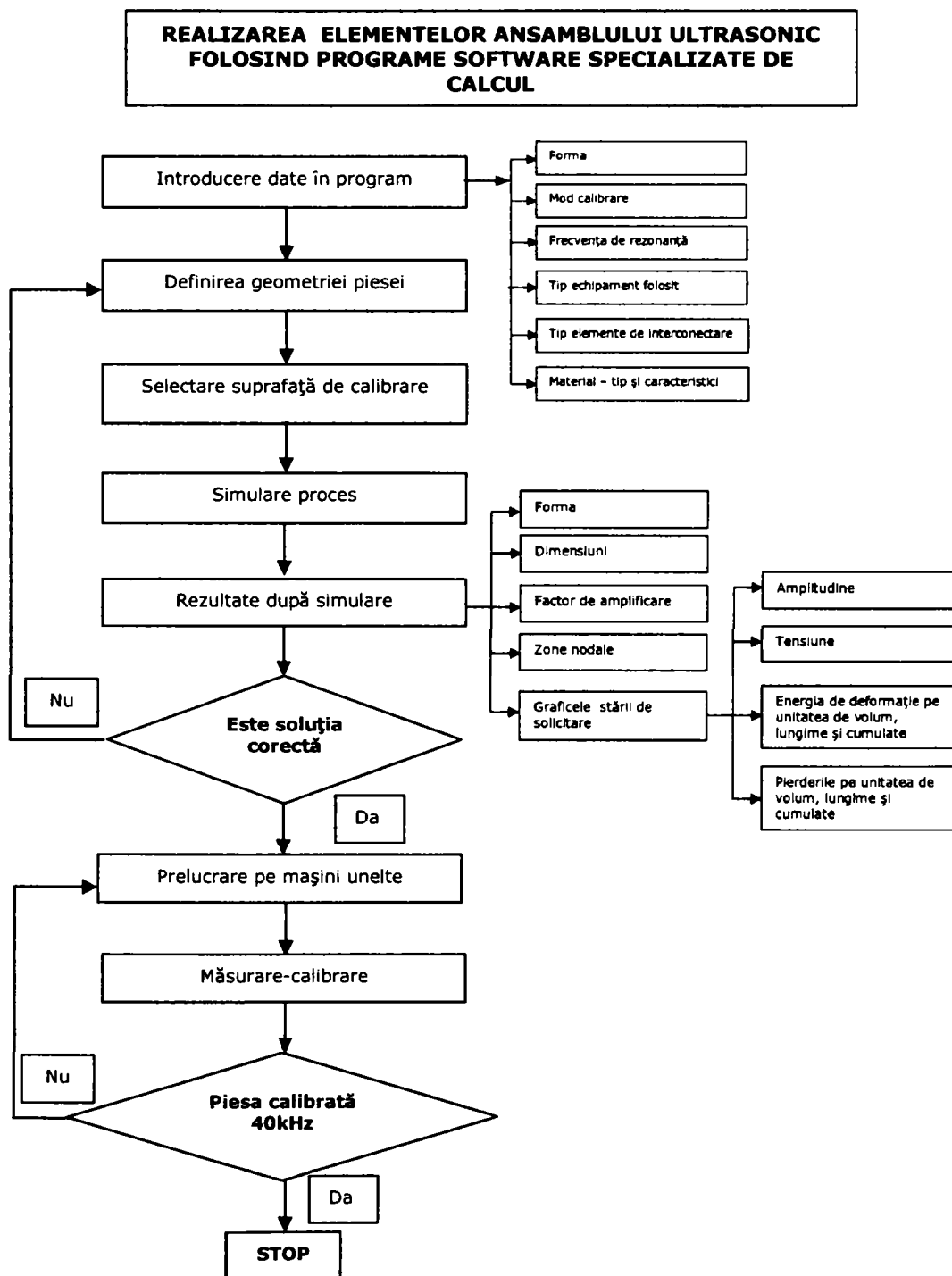
Acest generator are integrat modulul de comandă și programare în tehnică digitală și este destinat alimentării ansamblului ultrasonic cu element activ piezoceramic. Modulul energetic, generatorul de ultrasunete - comandă și control este alimentat la o linie de tensiune de 220V / 50Hz, frecvența de lucru fiind reglabilă în intervalul 38 – 39.2 kHz. Schema bloc a modulului energetic și de comandă specifică echipamentului de activare cu ultrasunete este prezentă în figura 6.4.



**Figura 6.4.** Schema bloc a modulului de comandă și control

Justificarea construirii și folosirii frecvenței de 40kHz constă în utilizarea unor sonotrode de gabarit longitudinal mai redus, de până la 25 cm, mult mai ușor de încorporat într-un dispozitiv de punere în formă a materialului polimeric topit (cap de extrudare sau matriță de injectare).

## 6.2.2. Realizarea ansamblului ultrasonic



**Figura 6.5.** Concepția și realizarea elementelor ansamblului ultrasonic folosind programe software

Toate elementele ce compun ansamblul ultrasonic trebuie dimensionate corespunzător pentru a rezona la frecvența dorită. Pentru aceasta se folosesc programe software specializate de calcul ce permit cunoașterea parametrilor de stare de solicitare, coeficientul de amplificare, amplasarea zonelor nodurilor și ventrelor, mărimea amplitudinii, curbele de variație ale pierderilor și ale stărilor de solicitare internă ale booster-ului și sonotrodei. Sunt definite forma și dimensiunile sistemului de interfațare cu elementele de cuplare – booster sau convertor piezoceramic. În figura 6.5. este prezentată schema de concepție și realizare a elementelor ansamblului ultrasonic (booster + sonotroda) în cazul utilizării softurilor dedicate (Krell Engineering, PowerSonics etc.).

Etapele necesare a fi parcurse pentru realizarea convertorului ultrasonic (booster-sonotrodă) sunt următoarele:

- selectarea unei frecvențe;
- alegerea materialului dorit;
- determinarea vitezei de propagare a sunetului în materialul ales;
- calculul dimensiunilor teoretice;
- întocmirea documentației de execuție a ansamblului ultrasonic;
- realizarea prototipului, acorduri și teste.

### 6.2.2.1. Selectarea unei frecvențe

Sistemul ultrasonic, format din generator și convertor ultrasonic (transductor + concentrator adaptor de undă) este construit pentru a funcționa la o frecvență fixă, frecvență de rezonanță.

Transferul energetic optim și eficacitatea activării este cu atât mai bună cu cât frecvențele sunt mai joase. Cum frecvențele din domeniul audibil sunt excluse, majoritatea echipamentelor au fost concepute pentru frecvența de 20kHz.

Pentru această frecvență însă, condiția funcționării în regim de rezonanță se traduce în componente mecanice cu dimensiuni care pot fi dificil adaptabile în procesele activate (ex.: pentru OL lungimea  $\lambda/2$  este de circa 164 mm pe direcția propagării). Activarea unui proces de injectare sau extrudare devine cu atât mai interesantă cu cât lungimea concentratorului adaptor de undă devine compatibilă cu dimensiunile zonei active. Ca atare, frecvența de 40kHz pare să fie un compromis acceptabil între eficacitatea activării și posibilitatea adaptării sistemului ultrasonic la procesul activat.

### 6.2.2.2. Alegerea materialului pentru construcția elementelor convertorului ultrasonic

La alegerea materialului s-a ținut cont ca acesta să prezinte rezistență înaltă la oboseală și pierderi acustice reduse (să nu absoarbă prea multă energie din vibrații). Aliajele de aluminiu de înaltă rezistență și titan sunt ideale pentru construcția elementelor convertorului ultrasonic. Mai sunt și alte materiale care pot fi folosite dar cu riscul unor pierderi ridicate de putere.

Materialele folosite în cadrul cercetărilor efectuate sunt:

- aliaj de titan grade 2;
- DURAL AISi<sub>1</sub>MgMn – ENAW6082.

Titan grade 2 este un titan pur ce oferă un excelent echilibru între rezistență și ductilitate. Are o bună reziliență și este deosebit de rezistent la coroziune. Caracteristicile materialului, conform certificatului de calitate livrat la achiziționarea materialului, sunt prezentate în tabelul 6.1.

**Tabelul 6.1.** Caracteristicile materialului Titan Grade 2

<b>Compoziția chimică</b>	<b>Elemente de aliere</b>	<b>Cantitate [%]</b>		
	Fe	0.25		
	Ni	0.03		
	O	Max. 0.25		
	H	Max. 0.015		
	C	0.08		
	Ti	Restul		
<b>Constantele fizice și proprietățile termice</b>	<b>Caracteristica de material</b>	<b>Valoare Impusă/obținută</b>		
	Densitatea [g/cm <sup>3</sup> ]	4.51		
	Temperatura de topire aproximativă [°C]	1670		
	Coeficientul de expansiune [um/m· °C]	0 – 100 °C	8.7	
		0 – 316 °C	9.2	
		0 – 538 °C	9.8	
		0 – 649 °C	10.1	
		0 – 816 °C	10.1	
	Conductivitatea termică [W/m· °C]	1.37		
	Rezistivitatea electrică [ohm · m]	0.093		
	Modulul de elasticitate la întindere x 10 <sup>6</sup> [psi]	14.9		
Modulul de elasticitate la torsiune x 10 <sup>6</sup> [psi]	6.5			
Energia specifică [J/kg· °C]	519.2			
<b>Proprietățile mecanice tipice</b>	Rezistența la tracțiune [MPa]	Min. 345	470	
	Limita de curgere [MPa]	Min. 275	310	
	Alungirea la rupere [%]	Min. 20	32	
	Contractia relativă [%]	Min 30	56	

Caracteristicile materialului AlSi<sub>1</sub>MgMn, conform certificatului de calitate livrat la achiziționarea materialului, sunt prezentate în tabelul 6.2.

**Tabelul 6.2.** Caracteristicile materialului Dural AlSi<sub>1</sub>MgMn – ENAW6082

<b>Compoziția chimică</b>	<b>Elemente de aliere</b>	<b>Cantitate [%]</b>	
	Si	1,02	
	Fe	0,210	
	Cu	0,021	
	Mn	0,772	
	Mg	0,920	
	Cr	0,143	
	Zn	0,030	
	Ti	0,018	
	Ni	0,002	
	Pb	0,008	
	Bi	0,003	
	Al	restul	
<b>Proprietățile mecanice</b>	<b>Caracteristica de material</b>	<b>Valoare impusă/obținută</b>	
	Rezistența la tracțiune [MPa]	310	353
	Limita de curgere R <sub>p</sub> 0,2 [MPa]	260	322
	Alungirea la rupere [%]	8	11



### 6.2.2.3. Determinarea vitezei de propagare a sunetului în materialul TiGr2

Pentru a determina viteza de propagare a sunetului  $V_s$  în materialul TiGr2St030 (figura 6.6.), folosit la construcția sonotrodelor, s-a folosit echipamentul USM35 și un palpator de 5MHz (seria MB5S-N).



**Figura 6.6.** Determinarea vitezei de propagare a sunetului. 1. Palpator 5MHz 2. Probe TiGr.2 3. Echipament de testare USM 35

Pentru a determina viteza sunetului s-a folosit etapele corespunzătoare procedurii în care nu se cunoaște viteza de propagare a sunetului în material. Pentru aceasta a fost necesar să se introducă distanța dintre 2 ecouri de calibrare ca date de calcul pentru aparat. Pe baza acestor date aparatul calculează automat viteza de propagare a sunetului în material și întârzierea în palpator. Probele de măsurat au fost 2 discuri tăiate din bara de titan de grosime 5.07mm și respectiv 10.06mm.

În urma determinărilor, pentru cele 2 discuri s-au obținut viteza de propagare a sunetului în materialul TiGr2:

$$V_{s(TiGr2Sto30)} = 4900m / s \quad (6.1)$$

$$V_{s(Dural)} = 5150m / s \quad (6.2)$$

Această determinare ne este de un real folos în etapa următoare de concepție a sonotrodelor folosind programe specializate de calcul și calibrare a acestora. Introducerea în program a unor date cât mai exacte duce la scurtarea etapelor de calibrare a sonotrodelor prin reducerea numărului de recalibrări.

### 6.2.2.4. Calcularea dimensiunilor teoretice folosind programe specializate

Etapele premergătoare pentru obținerea formelor și dimensiunilor elementelor ultrasonice (sonotrodă, amplificator intermediar - booster) pentru ansamblul rezonator, construit în multipli de  $\lambda/2$ , ce lucrează la frecvența de 40kHz, folosind programe specializate de calcul, au constat în parcurgerea următoarelor etape:

- a. Introducerea datelor în program. Se introduc informații cu privire la tipul de sonotrodă dorit a se utiliza (cilindrică, conică, exponențială sau

catenoidală), frecvența de lucru a sistemului ultrasonic (40 kHz), raportul de amplificare a booster-ului (2.5:1), dimensiunea prezoanelor de interconectare și se definește modul de realizare a calibrării (autocalibrare).

- Definirea caracteristicilor materialului sonotrodei/booster-ului (TiGr2/300AlMg3). Se introduc mărimile caracteristice materialului (viteza de propagare a sunetului, modulul de elasticitate, densitatea materialului, coeficientul Poisson etc.). Mărimile caracteristice ale aliajului folosite în program sunt cele specificate în fișa de livrare a materialului.
- Definirea geometriei sonotrodei/booster-ului. Se definesc suprafețele exterioare și interioare ale sonotrodei/booster-ului și se specifică materialul din care sunt realizate.
- Selectarea suprafeței de autocalibrare. Se alege suprafața din care se execută autocalibrarea și rulează aplicația.
- Simularea și vizualizarea rezultatelor: dimensiunile după calibrare, factorul de amplificare al sonotrodei, starea de solicitare maximă, punctul nodal, graficele de variație a stării de solicitare, graficele de variație a pierderilor, graficul amplitudinii etc.

Starea de solicitare internă a materialului constituie elementul de dimensionare la oboseală a sculei de lucru (sonotroda) pentru secțiuni critice respectiv cu stare de solicitare maximă.

Elementele de caracterizare ale ansamblului ultrasonic (transductor, sonotrodă și booster) ce lucrează la frecvența de rezonanță de 40 kHz, rezultate în urma simulării cu programe specializate sunt prezentate în tabelul 6.3.

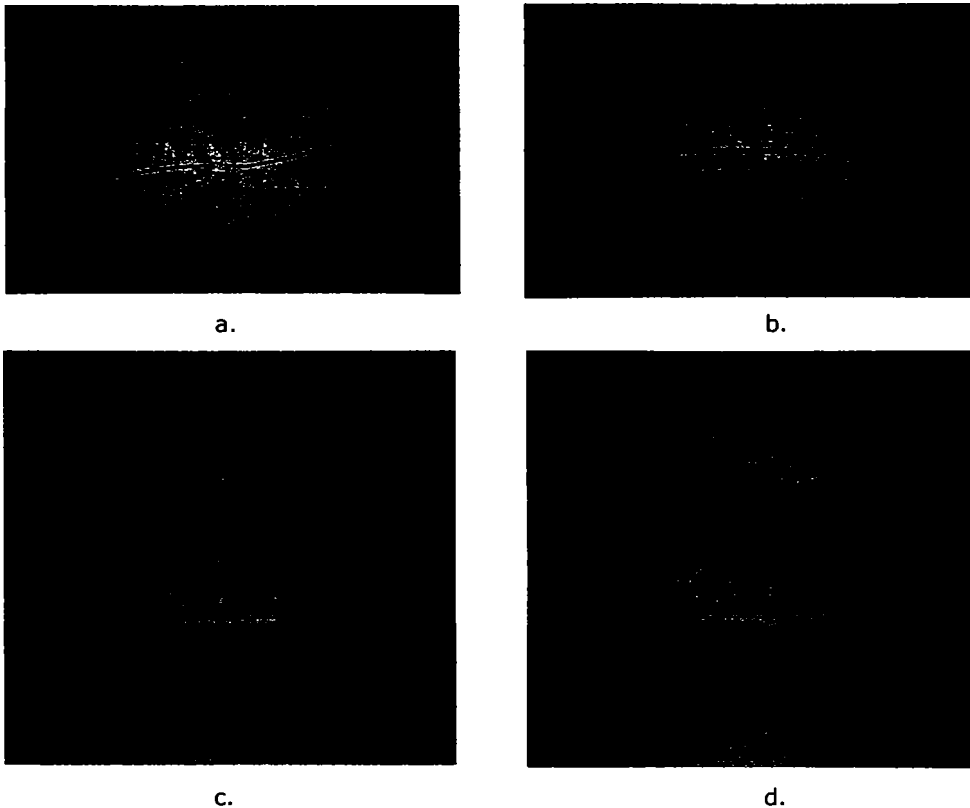
**Tabelul 6.3.** Elementele teoretice de caracterizare a ansamblului ultrasonic

Componenta		Transductor	Booster	Sonotrodă exponențială	Sonotrodă conică
Materialul		PTZ5	AlSi <sub>1</sub> MgMn	Aliaj TiGr.2	Aliaj TiGr.2
Lungimea [mm]		57	72.8	87.9	82.5
Frecvența rezonanță [kHz]		40	40	40	40
Factor amplificare/ Factor de calitate Q		-	2.46/100000	5.29/26000	2.78/26000
Coordonata nod oscilație [mm]		-	31.9	30.6	29.3
Solicitare maximă [MPa/mm]	La 1μm ieșire	-	1.57/54.5	1,87 /64.6	1,84/47.9
Energia totală de deformație [Joules]		-	2.9x10 <sup>-4</sup>	7.5x10 <sup>-5</sup>	1.19x10 <sup>-4</sup>
Puterea disipată [Watt]		-	7.5x10 <sup>-4</sup>	7.3x10 <sup>-4</sup>	1.1x10 <sup>-3</sup>

În urma calculelor efectuate, s-au obținut formele și dimensiunile teoretice ale boosterului, sonotrodei și ale elementelor de interconectare ale convertorului ultrasonic (prezoane).

În figura 6.7. sunt prezentate caracteristicile, forma și dimensiunile boosterului în urma simulării cu programe specializate precum și alte date furnizate de program:

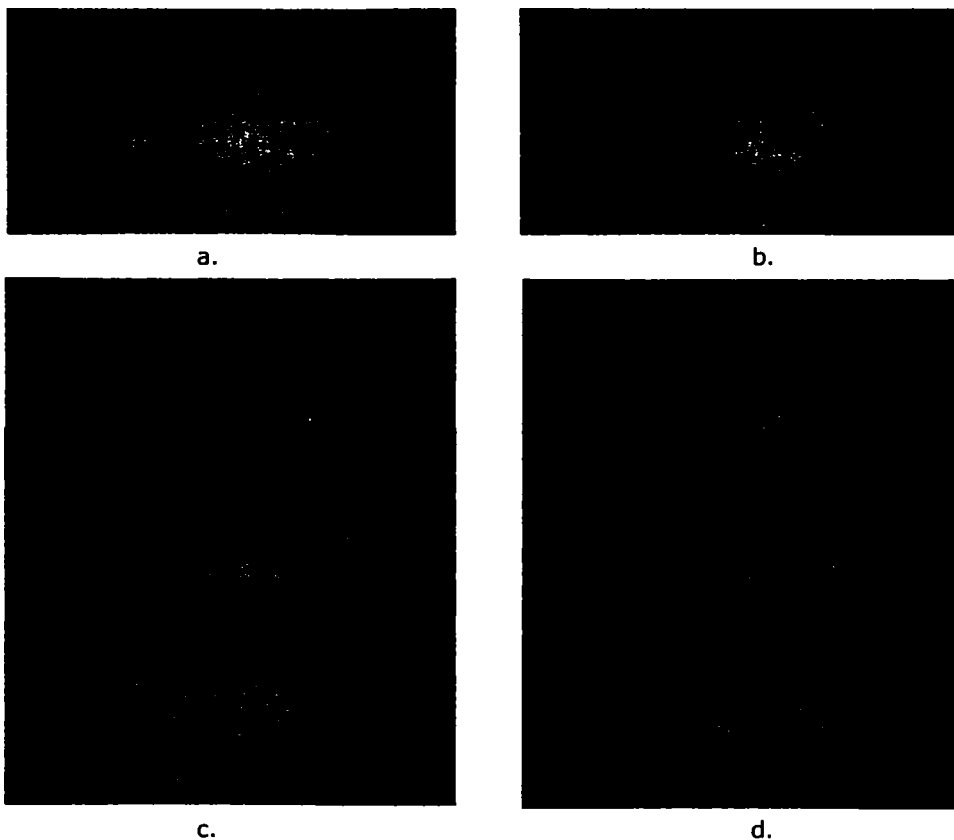
- mărimea și modul de variație a amplitudinii relative de-a lungul elementului booster;
- variația energiei de deformație (pe unitatea de volum, lungime);
- curbele de variație a pierderilor (pe unitate de volum, lungime și cumulate).



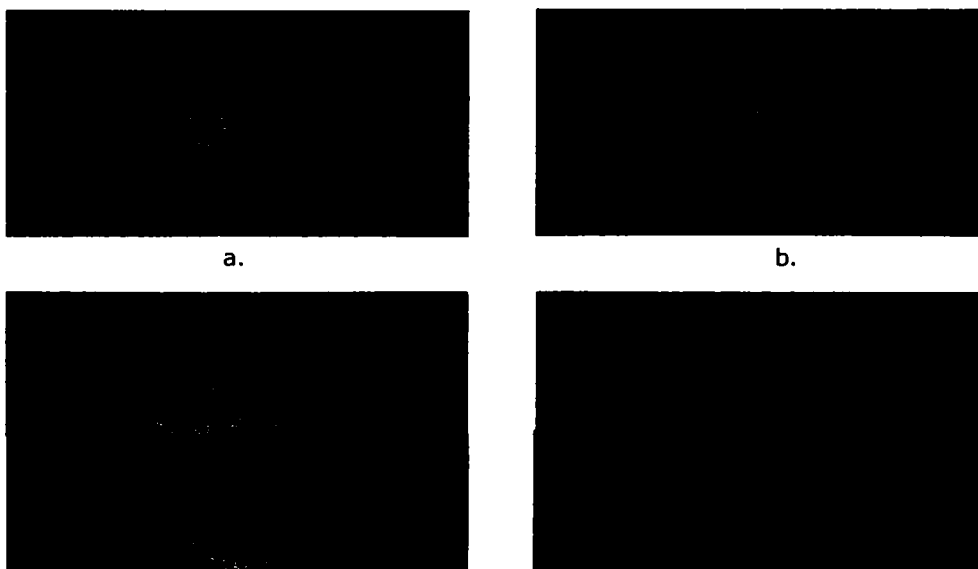
**Figura 6.7.** Caracteristicile elementului booster: **a.** Forma, dimensiunile și tensiunile la intrare și ieșire; **b.** Mărimea și modul de variație a amplitudinii de-a lungul boosterului; **c.** Curbele corespunzătoare energiei de deformație (pe unitatea de volum, lungime și cumulate); **d.** Curbele de variație a pierderilor (pe unitatea de volum, lungime și cumulate);

În continuare sunt prezentate caracteristicile, forma și dimensiunile sonotrodelor exponențială (figura 6.8.) și conică (figura 6.9.) din TiGr2 în urma simulării cu programe specializate precum și alte date furnizate de program:

- mărimea și modul de variație al amplitudinii relative în lungul sonotrodei;
- variația tensiunii în lungul sonotrodei;
- variația energiei de deformație pe unitatea de volum, lungime;
- curbele de variație a pierderilor pe unitate de volum, lungime și cumulate.



**Figura 6.8.** Caracteristicile elementului sonotrodă exponențială: **a.** Forma, dimensiunile, curba de variație a tensiunii în lungul sonotrodei; **b.** Mărimea și modul de variație a amplitudinii de-a lungul boosterului; **c.** Curbele corespunzătoare energiei de deformație (pe unitatea de volum, lungime și cumulate); **d.** Curbele de variație a pierderilor (pe unitatea de volum, lungime și cumulate)





**Figure 6.9.** Caracteristicile elementului sonotrodă conică: **a.** Forma, dimensiunile, curba de variație a tensiunii în lungul sonotrodei; **b.** Mărima și modul de variație a amplitudinii de-a lungul boosterului; **c.** Curbele corespunzătoare energiei de deformație (pe unitatea de volum, lungime și cumulate); **d.** Curbele de variație a pierderilor (pe unitatea de volum, lungime și cumulate)

### 6.2.2.5. Întocmirea documentației de execuție a ansamblului ultrasonic

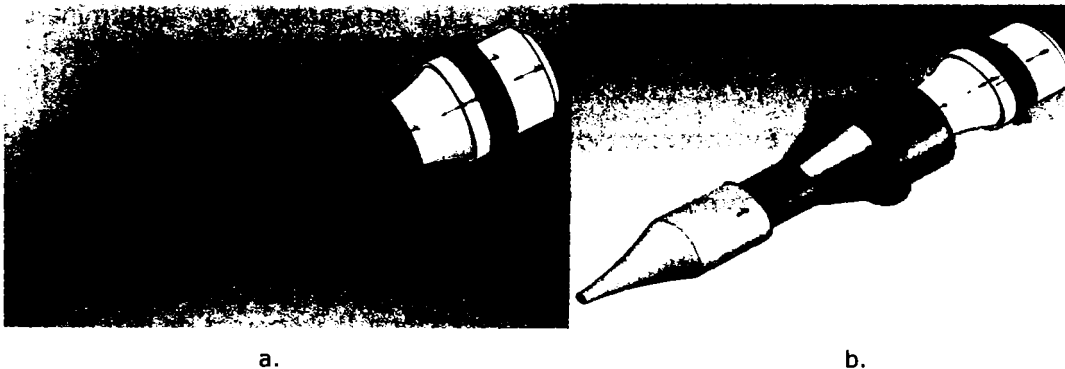
Întocmirea documentației de execuție a elementelor convertorului rezonator ultraacustic s-a realizat folosind programe specializate de proiectare pe calculator. De asemenea, tot cu ajutorul calculatorului s-a realizat și simularea prelucrării pe mașini cu comandă numerică. Această etapă este deosebit de importantă pentru obținerea formelor finale ale elementelor ce alcătuiesc ansamblul ultrasonic.

Etapa de proiectare și simulare a prelucrării pe mașini cu comandă numerică folosind calculatorul prezintă următoarele avantaje:

- înlătură apariția eventualelor erori de asamblare în urma prelucrării;
- asigură simularea prelucrării componentelor ansamblului ultrasonic folosind comanda numerică;

Formele proiectate ale elementelor ansamblului ultrasonic asamblate sunt prezentate în figura 6.10.:

- ansamblul ultrasonic cu sonotrodă conică (figura 6.10.a);
- ansamblul ultrasonic cu sonotrodă exponențială (figura 6.10.b).



**Figura 6.10.** Forma proiectată a ansamblului ultrasonic

### 6.2.3. Realizarea modelelor experimentale și testarea acestora folosind aparatură specializată

La construcția propriu-zisă de sonotrode și concentratoare intermediare specializate (booster), după calcularea dimensiunilor teoretice, s-au adăugat la valoarea obținută rații de 2-4 mm. Acest material va fi îndepărtat pe parcursul

procesului de prelucrare (de calibrare a sonotrodei, booster) și are rolul de a preveni eventualele rebuturi provenite din concepție.

În urma prelucrării elementelor ansamblului ultrasonic, frecvențele brute obținute ca rezultat al prelungirii de 2-4mm aduse, sunt cu circa 0.5 – 2 kHz sub frecvența de rezonanță dorită. Aducerea sonotrodei la frecvența dorită s-a obținut prin scurtarea și remăsurarea elementelor convertorului ultrasonic în mai multe etape, etape ce vor fi prezentate în continuare.



**Figura 6.11.** Alcătuirea standului de verificări funcționale și tehnologice

Verificarea funcțională și evaluarea din punct de vedere al performanțelor tehnice și tehnologice a convertorului ultrasonic folosit la activarea curgerii materialelor polimerice, în vederea demonstrării funcționalității, s-a realizat utilizând aparatură specializată prezentată în figura 6.11. Standul de verificări este format din: ansamblul rezonator mecanic 40kHz (1), echipament de determinare a frecvenței și impedanței la rezonanță (2), osciloscop (3), generator de semnal (4), modulul de comandă și programare – generatorul ultrasonic (5) și amplifmetru (6).

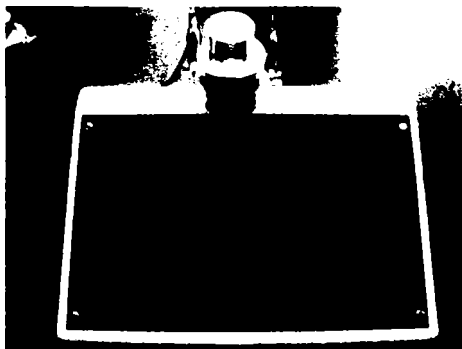
### 6.2.3.1. Evaluarea performanțelor sistemului ultraacustic

#### ***Calibrarea și caracterizarea transductorului ultraacustic folosind aparatură specializată***

Transductorul piezoceramic transformă energia electrică de înaltă frecvență în vibrații mecanice de înaltă frecvență. Pentru aplicația ce urmează a fi realizată se va folosi un transductor de 40kHz. Acesta este calibrat la frecvența de rezonanță de 40kHz și caracterizat din punct de vedere al performanțelor sale.

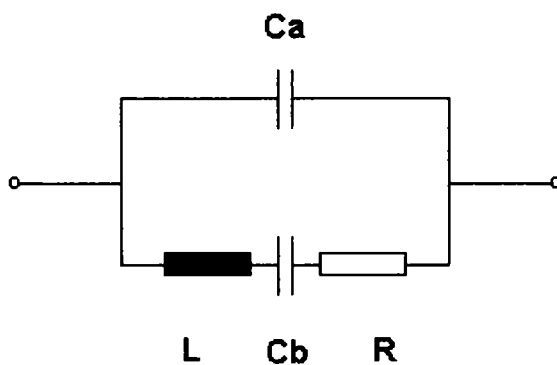
Transductorul piezoceramic a fost adus de la frecvența de 37 kHz la frecvența de 40kHz prin măsurări și îndepărtarea succesivă de straturi de material din zona de vârf a acestuia. În figura 6.12. se prezintă echipamentul folosit în operația de măsurare în vederea calibrării a transductorului piezoceramic.

După operația de calibrare, de aducere la frecvența de rezonanță de 40kHz (impedanța  $Z=9\Omega$ ), transductorul a fost caracterizat din punct de vedere electric, respectiv din punct de vedere al performanțelor acestuia.

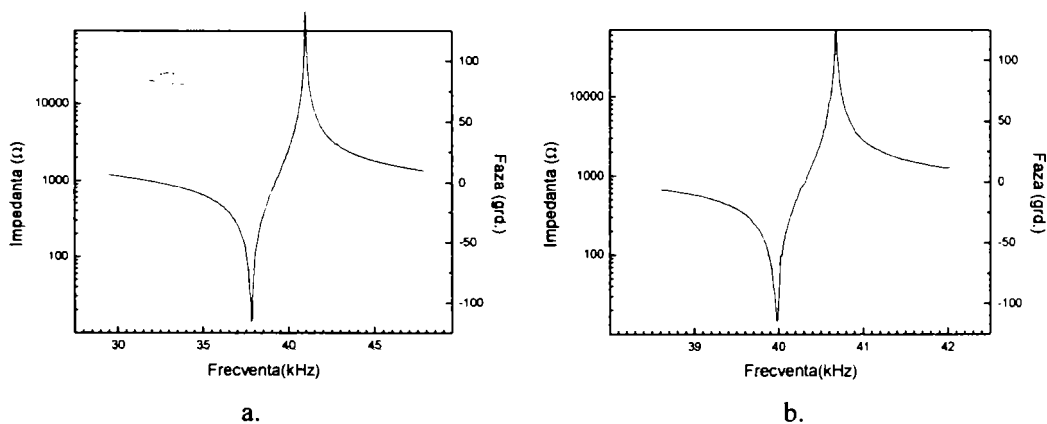


**Figura 6.12.** Echipament de măsurare a frecvenței și impedanței la rezonanță

În figura 6.14. sunt prezentate graficele dependenței impedanței funcție de frecvență pentru transductorul de 37kHz în comparație cu cel obținut de 40kHz, conform schemei de circuit echivalent din figura 6.13. Se observă că transductorul de 40kHz obținut nu prezintă caracteristici modificate față de transductorul inițial.

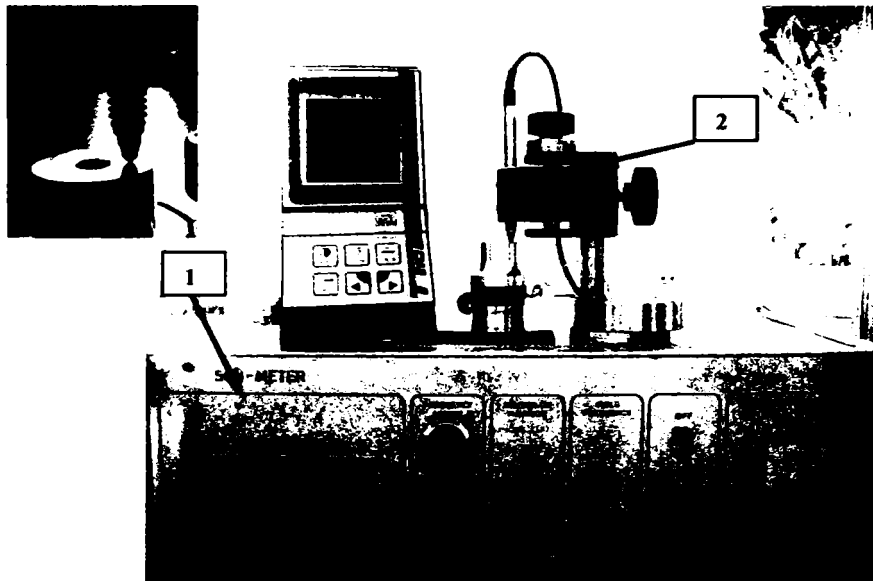


**Figura 6.13.** Schema de circuit echivalent al unui transductor



**Figura 6.14.** Graficele dependenței impedanței funcție de frecvență:  
**a.** Transductor original - 37kHz; **b.** Transductor modificat - 40kHz

În vederea determinării mărimii amplitudinii transductorului s-a folosit un sonometru de laborator (1) și amplifmetrul (2) - figura 6.15. Sonometrul poate să genereze atât semnal de 20 kHz cât și de 40 kHz și o încărcare măsurată la 1 mA de până la 13mA.



**Figura 6.15.** Stand de măsurare a amplitudinii alcătuit din: sonometru de laborator (1) și amplifmetru (2)

Folosind semnalul generat de sonometrul 1 și un echipament specializat 2 (amplifmetru), a fost posibilă măsurarea amplitudinii transductorului piezoceramic la frecvența de rezonanță, de 40kHz, la o încărcare de 10-13mA. Valoarea extinderii sonotrodei măsurată la amplifmetru este de 3,5μm. Întrucât amplitudinea reprezintă intervalul de mărime dintre punctul de comprimare și cel de extindere putem spune că:

$$A_{\text{transductor}} \approx 7\mu\text{m} \quad (6.3)$$

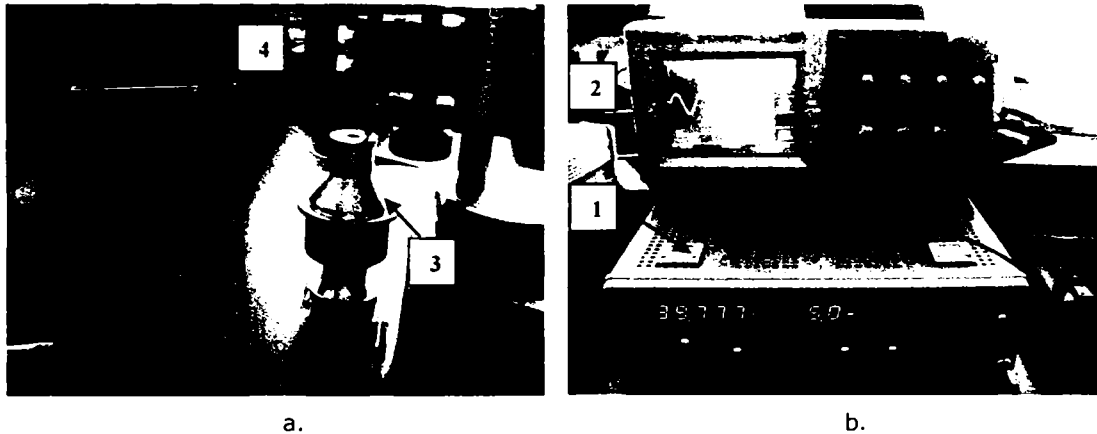
### **Calibrarea și caracterizarea elementului booster folosind aparatură specializată**

Ca și în cazul celorlalte componente ale ansamblului ultrasonic, componenta de tip amplificator intermediar (booster), construită în multipli de  $\lambda/2$  trebuie calibrată pentru a funcționa la frecvența de rezonanță, de 40kHz.

În vederea calibrării și a măsurării amplitudinii în zona finală, de ieșire a booster-ului, în figura 6.16.b este reprezentată verificarea ansamblului transductor-booster (3) cu echipament specializat, alcătuit din:

- Generator de semnal (1);
- Osciloscop de frecvență (2);
- Amplifmetru (4).





**Figura 6.16.** Stand experimental de testare a ansamblului transductor-booster cu aparatură specializată: **1** – osciloscop; **2** – generator de semnal; **4** - amplifmetru

În figura 6.16.b sunt prezentate și graficele formelor de undă la bornele convertorului piezoceramic cuplat cu transformatorul de amplitudine (booster) la frecvența de rezonanță de 39.777 kHz și impedanță 9Ω. Coeficientul teoretic de amplificare al ansamblului booster la frecvența de rezonanță este de 1:2.5, iar valoarea extinderii măsurată la ieșirea din ansamblul transductor-booster este de aproximativ 8μm la o putere de 50 W (figura 6.16.a). Întrucât amplitudinea reprezintă intervalul de mărime dintre punctul de comprimare și cel de extindere putem spune că:

$$A_{booster} \approx 16\mu m \quad (6.4)$$

Zona nodală are o mare importanță în construcția ansamblului ultrasonic și în special a booster-ului. Este foarte important ca aceasta să fie identică ca valoare și situată între componenta teoretică obținută prin simulare și componenta fizică obținută în urma prelucrării și calibrării ultraacustice. Identificarea corectă a zonei nodale a booster-ului este imperios necesară pentru:

- realizarea umărului de spijin al ansamblului ultrasonic în dispozitivul de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice;
- obținerea unui factor de amplificare maxim la vârful booster-ului.



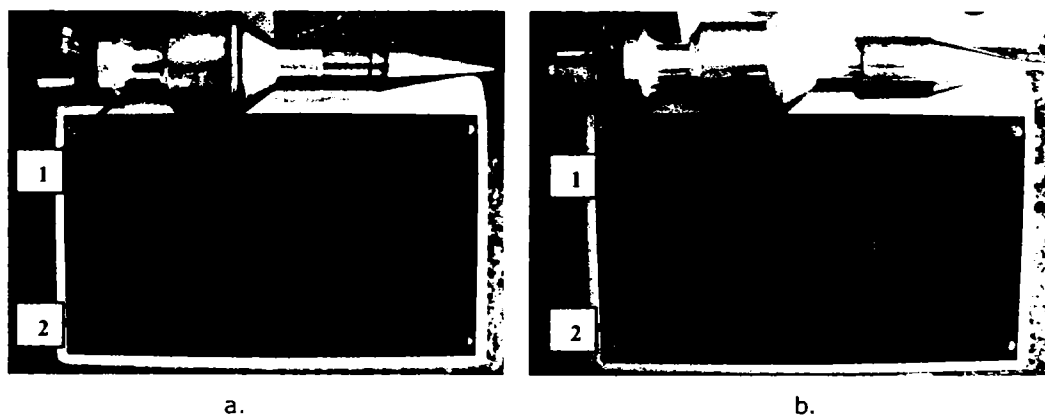
**Figura 6.17.** Suprafețele transductorului și a booster-ului ultrasonic după finisare

De remarcat că suprafețele de contact dintre transductor și elementul de tip booster au fost rectificat și superfinisate (figura 6.17.) în vederea obținerii unor suprafețe cu rugozitate cât mai mică și perfect paralele. Finisarea s-a realizat cu hârtie metalografică de granulație 1500 (sita de cernere a granulelor abrazive pe coala de hârtie a avut 1500 orificii per 1 inch<sup>2</sup>), iar superfinisarea s-a realizat folosind pâslă și pastă de diamant în suspensie 1 – 3 $\mu$ m.

**Calibrarea și caracterizarea ansamblului ultrasonic complet folosind aparatură specializată (transductor asamblat cu rezonator booster și sonotrodă specializată din titan grade 2)**

Ca și în cazul celorlalte componente ale ansamblului ultrasonic, componenta de tip sonotrodă, construită tot în multipli de  $\lambda/2$  trebuie calibrată pentru a funcționa la frecvența de rezonanță dorită.

Testarea sonotrodelor, transductorului și a întregului ansamblu ultrasonic (1), în vederea aducerii la rezonanță, poate fi realizată și cu echipamente portabile specializate (2), figura 6.18.

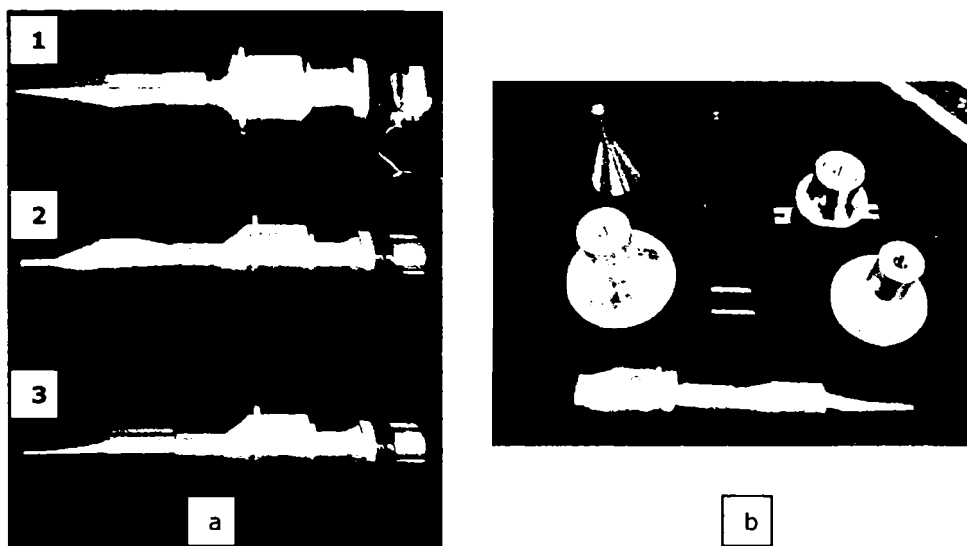


**Figura 6.18.** Testarea la rezonanță a ansamblului ultrasonic complet (a. Conic; b. exponențial): 1. Ansamblu ultrasonic complet.  
2. Echipament portabil de măsurare-testare ansamblu ultrasonic

După operații repetate de calibrare (îndepărtare a plusului de material și măsurători repetate) s-au obținut formele finale ale ansamblurilor ultrasonice ce lucrează la frecvența de rezonanță dorită:

- 39,777kHz și impedanța 51 $\Omega$  – pentru ansamblul ultrasonic cu sonotrodă conică (figura 6.18.a);
- 39,607kHz și impedanța 23 $\Omega$  - pentru ansamblul ultrasonic cu sonotrodă exponențială (figura 6.18.b).

După calibrare prin prelucrare și verificare cu aparatură specializată, în vederea obținerii dimensiunilor finale ale elementelor ansamblului ultrasonic, s-au obținut formele finale ale sonotrodelor (1 – conică; 2 – compusă, 3- exponențială), formele finale ale ansamblurilor intermediare tip booster precum și cele ale elementelor de interconectare – prezoane, figura 6.19.



**Figura 6.19.** Ansabluri ultrasonice complete (a); Elemente ale ansamblului ultrasonic (b)

Utilizând aparatură specifică de laborator (amplifmetru), prezentată în imaginea din figura 6.20., s-a măsurat amplitudinea de oscilație la vârful sonotrodei conice. Aceasta corespunde cu amplitudinea teoretică  $24\mu\text{m}$  la frecvența de  $39,777\text{ kHz}$  la o încărcare de  $50\text{W}$  rezultată din linia ansamblului rezonator mecanic format din convertor piezoceramic, transformator de amplitudine și sonotrodă.



**Figura 6.20.** Măsurarea amplitudinii de oscilație la vârful sonotrodei conice

Elementele ansamblului ultraacustic alcătuit din transductor piezoceramic, booster și sonotrodă au fost conectate, în vederea alcătuirii ansamblului ultraacustic, folosind prezoane din oțel de scule.

Elementele de caracterizare ale ansamblului ultrasonic (transductor, booster și sonotrodă conică), utilizat în cadrul experimentărilor ce lucrează la frecvența de rezonanță de  $40\text{ kHz}$ , rezultate în urma prelucrării și calibrării sunt prezentate în tabelul 6.4.

**Tabelul 6.4.** Elementele de caracterizare a ansamblului ultrasonic după calibrare măsurate la o putere de 50W

Materialul	Componenta	Lungimea [mm]	Frecvența rezonanță [kHz]	Mărimea amplitudinii [ $\mu\text{m}$ ]	Coordonata nod oscilație [mm]
PTZ5	Transductor	57	40	7	-
AlSi <sub>1</sub> MgMn	Booster	68,76	40	16	31.9
Aliaj TiGr.2	Sonotrodă conică	80,46	40	24	29.3

### 6.3. Factori de influență în procesul de activare cu ultrasunete

#### 6.3.1. Influența temperaturii asupra factorului frecvență de rezonanță

Este foarte important de analizat limitele de variație ale frecvenței de rezonanță ale ansamblului ultrasonic funcție de temperatura de procesare a materialelor polimerice. Modificarea frecvenței de rezonanță conduce la scoaterea din rezonanță a ansamblului ultrasonic prin încetarea efectelor ultrasonice în mediul de propagare. Pentru a preveni scoaterea din rezonanță a ansamblului ultrasonic este necesar să se cunoască intervalul de variație a frecvenței cu temperatura. De asemenea, generatorul de ultrasunete trebuie astfel conceput încât să fie capabil, în anumite limite de frecvență, să mențină ansamblul ultrasonic la rezonanță.



**Figura 6.21.** Stand experimental folosit la determinarea variației frecvenței de rezonanță funcție de temperatură: **1** – sonotrodă conică; **2** – termocuplă; **3** – generator de aer cald; **4** – generator de semnal; **5** - osciloscop

Pentru a determina modul cum variază frecvența de rezonanță a sistemului în funcție de temperatura de procesare s-a folosit standul din figura 6.21. În alcătuirea acestuia intră ansamblul ultrasonic (1), senzorul de temperatură cu afișaj digital (2), generatorul de aer cald cu temperatură reglabilă în intervalul 50 – 600°C (3), generatorul de semnal (4) și osciloscopul (5).

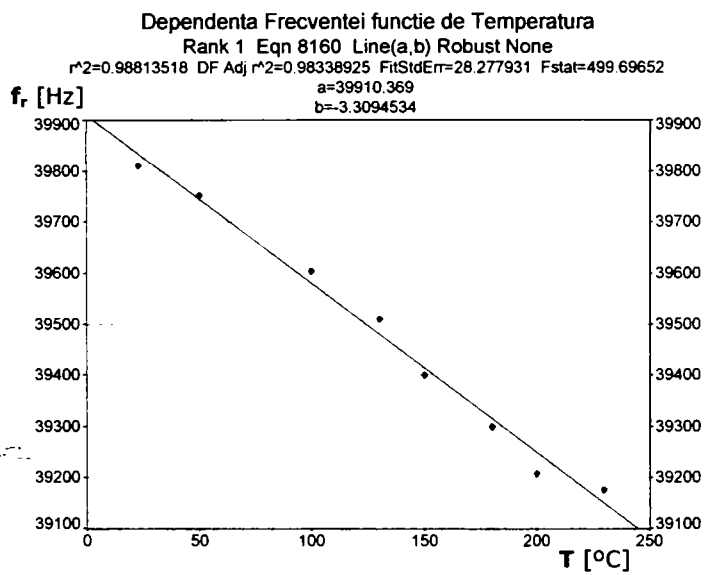
În vederea realizării experimentului, ansamblul ultrasonic a fost conectat la un generator de semnal și un osciloscop pentru a măsura valorile frecvenței de rezonanță la diferite temperaturi ale ansamblului ultrasonic.

Experimentările au constatat în încălzirea progresivă a sonotrodei în zona de contact a acesteia cu materialul polimeric în stare de topitură și măsurarea frecvenței pentru diferite valori de temperatură.

S-au realizat mai multe încercări și s-au obținut dependențele dintre temperatură și frecvența de rezonanță prezentate în tabelul 6.5. Încălzirea sonotrodei la valori fixe a fost posibilă prin utilizarea unui generator de aer cald cu afișaj digital ce permite reglarea cu precizie a temperaturii la ieșirea din acesta. Pentru a certifica valoarea temperaturii la nivelul sonotrodei conice s-a folosit o termocuplă cu afișaj digital al temperaturii.

**Tabelul 6.5.** Variația frecvenței de rezonanță a ansamblului ultrasonic funcție de temperatură

Nr. crt.	Temperatura, $T$ [°C]	Frecvența de rezonanță, $f_r$ [Hz]
1	23	39812
2	50	39753
3	100	39604
4	130	39510
5	150	39400
6	180	39300
7	200	39209
8	230	39177



**Figura 6.22.** Graficul de variație a frecvenței de rezonanță funcție de temperatură

XY	X Value	Y Value	Y Predict	Residual	Residual%	95% Confidence Limits	95% Prediction Limits	Weights
1	23.000000	3.981e+04	3.983e+04	-22.25119	-0.055891	3.979e-04 3.988e-04	3.975e-04 3.992e-04	1
2	50.000000	3.975e+04	3.974e+04	8.1040488	0.0203860	3.971e-04 3.978e-04	3.967e-04 3.982e-04	1
3	100.000000	3.96e+04	3.958e+04	24.576719	0.0620562	3.955e-04 3.961e-04	3.951e-04 3.965e-04	1
4	130.000000	3.951e+04	3.948e+04	29.860321	0.0755766	3.946e-04 3.95e-04	3.941e-04 3.955e-04	1
5	150.000000	3.94e+04	3.941e+04	-13.95061	-0.035408	3.939e-04 3.944e-04	3.934e-04 3.949e-04	1
6	180.000000	3.93e+04	3.931e+04	-14.66701	-0.037321	3.928e-04 3.934e-04	3.924e-04 3.939e-04	1
7	200.000000	3.921e+04	3.925e+04	-39.47794	-0.100686	3.921e-04 3.928e-04	3.917e-04 3.933e-04	1
8	230.000000	3.918e+04	3.915e+04	27.805662	0.0709745	3.911e-04 3.919e-04	3.907e-04 3.923e-04	1

Utilizând programe software speciale (TableCurve) s-a ridicat graficul  $f_r = f(T)$  și s-a observat că frecvența de rezonanță variază invers proporțional cu temperatura, variație aproape liniară, reprezentată în figura 6.22. De asemenea, utilizarea acestui program ne generează automat și ecuațiile de caracterizare a curbei și permite aprecierea limitelor de încredere cu privire la rezultatele obținute.

Un alt factor important în caracterizarea ansamblului ultrasonic este reprezentat de modul cum influențează vâscozitatea mediului polimeric în stare de topitură asupra factorului frecvență de rezonanță, impedanță acustică și putere transmisă.

### 6.3.2. Influența mediului polimeric asupra factorului putere transmisă

La activarea curgerii materialelor polimerice în stare de topitură cu ultrasunete trebuie ținut seama de densitatea mediului activat. Aceasta are o influență directă asupra modului de funcționare a ansamblului ultraacustic prin modificarea frecvenței de rezonanță a ansamblului și respectiv prin diminuarea puterii acustice transmisă de sonotrodă mediului de reacție.

De asemenea, o importanță deosebită asupra comportării ansamblului ultraacustic în cadrul activării o are densitatea mediului polimeric de reacție utilizat și respectiv lungimea pe care se imersează sonotroda în mediul polimeric în stare de topitură. Cunoscând aceste date se poate calcula puterea acustică transmisă de sonotrodă mediului polimeric în stare de topitură.

Puterea acustică transmisă de sonotrodă mediului este dată de relația:

$$P_a = 1/2 \rho c \xi \quad [w] \quad (6.5)$$

în care:

$\rho$  = densitatea de forță pe suprafața în sarcină  $[N/m^2]$ ;

$c$  = viteza de propagare a sunetului în materialul sonotrodei  $[m/s]$ ;

$\xi$  = amplitudinea de oscilație  $[\mu m]$ .

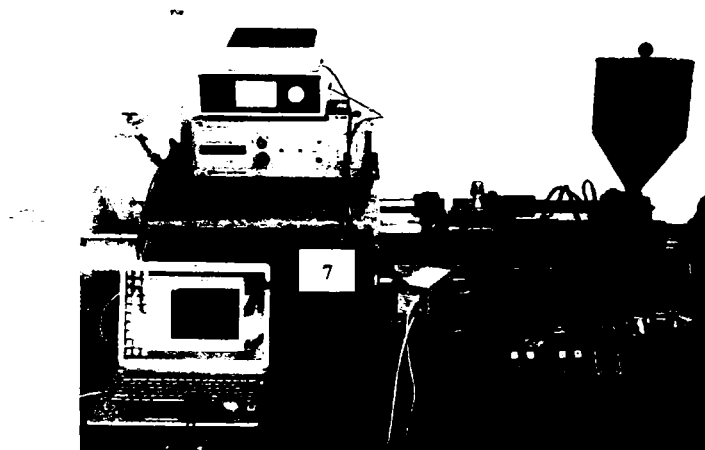
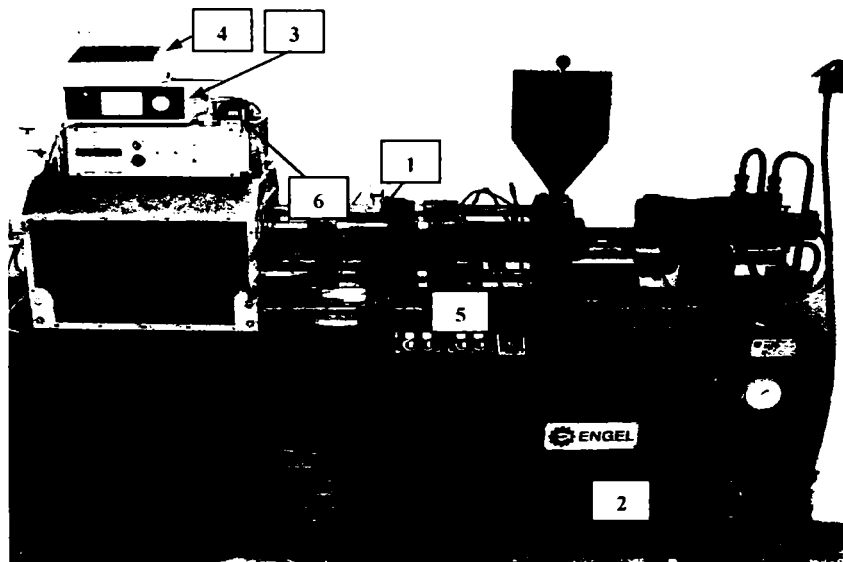
Pentru a se putea calcula puterea acustică transmisă este imperios necesar a se cunoaște modul cum variază densitatea materialelor polimerice folosite la temperatura de procesare în cadrul experimentărilor.

## 6.4. Construcția standului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice

Standul experimental ce urmează a fi realizat trebuie să fie capabil să îndeplinească următoarele funcții necesare pentru desfășurarea în bune condiții a cercetărilor experimentale:

- să asigure o curgere continuă a polimerului atât la nivelul cilindrului de extrudare cât și la nivelul dispozitivului de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic;
- să permită reglarea dar și monitorizarea parametrilor de proces:
  - temperatura de procesare pe tot traseul parcurs de polimerul topit, de la intrarea acestuia în cilindrul extruderului până la ieșirea acestuia prin duza dispozitivului de curgere și instalare a

- ansamblului ultrasonic;
  - presiunea și viteza de curgere a polimerului la nivelul cilindrului de extrudare;
  - frecvența de rezonanță a ansamblului ultrasonic;
  - durata pe care se realizează extrudarea.
- să permită studierea comportamentului curgerii mediului polimeric cu și fără activare cu ultrasunete pentru diferite valori ale interstițiului de curgere și ale distanței de imersare a ansamblului ultrasonic în dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic.



**Figura 6.23.** Stand experimental de activare cu ultrasunete a curgerii mediilor polimerice

În vederea realizării cercetărilor experimentale privind studierea comportamentului de curgere a materialelor polimerice în stare de topitură activate cu ultrasunete s-a construit standul experimental prezentat în figura 6.23.

Principalele elemente ce intră în alcătuirea standului experimental urmează a fi prezentate în continuare:

- dispozitivul de activare a curgerii materialelor polimerice (1);
- mașina de injectare - extrudare (2);
- generator ultrasonic (3);
- echipament de măsurare a frecvenței și impedanței la rezonanță (4);
- echipament de încălzire a dispozitivului ansamblului ultrasonic - generator de aer cald (5);
- echipamente de monitorizare a temperaturii (6):
  - la nivelul dispozitivului de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic;
  - la nivelul duzei de extrudare.
- Echipament de monitorizare a procesului de curgere (7) alcătuit din:
  - cameră video de mare viteză (1000fps);
  - calculator portabil echipat cu un sistem software adecvat.

#### **6.4.1. Construcția dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic de activare a curgerii materialelor polimerice**

Construcția dispozitivului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice ține seama atât de formele și dimensiunile ansamblului ultrasonic cât și de detaliile tehnice privind:

- modul de prindere și centrare al dispozitivului pe echipamentul de procesare a materialelor polimerice (echipament de extrudare-injectare);
- forma și dimensiunile zonei de extrudare – o construcție necorespunzătoare a acestei zone ar conduce la imposibilitatea realizării unei bune centrări și etanșări a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe echipamentul de extrudare-injectare;
- zona de amplasare a planului de extrudare în dispozitiv.

Etapetele necesare a fi parcurse în vederea obținerii dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic au constat în:

- concepția dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic;
- proiectarea și simularea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic folosind programe dedicate;
- prelucrarea componentelor dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe mașinile cu CNC;
- asamblarea și verificarea funcțională a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic.

##### **6.4.1.1. Concepția dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice**

La concepția dispozitivului ansamblului ultrasonic de activare a curgerii materialelor polimerice cu ultrasunete trebuie să se aibă în vedere găsirea soluțiilor optime privind formele și dimensiunile elementelor dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic astfel încât să satisfacă scopul pentru care acesta a fost conceput. Trebuie să se aibă în vedere asigurarea zonelor de centrare și fixare a ansamblului ultrasonic, a zonelor de etanșare dintre dispozitiv și ansamblul ultrasonic, asigurarea traseului de curgere a materialelor polimerice în stare de topitură prin canalele de curgere practicate în dispozitivul de curgere și instalare al



ansamblului ultrasonic și respectiv găsierea de soluții pentru asigurarea unei răcirii optime în zona transductorului piezoceramic.

De asemenea, formele dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic trebuie să fie în concordanță cu forma și dimensiunile zonei de fixare de pe mașina de extrudare-injectare folosită în cadrul experimentărilor. Astfel, trebuie acordată atenție deosebită zonei de etanșare și centrare dintre dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic și filiera de extrudare (zona de capăt a cilindrului extruderului).

**Stabilirea formelor geometrice ale zonei de extrudare a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic.** Operația de stabilire a formei zonei de extrudare a constat mai întâi în stabilirea echipamentului de procesare a materialelor polimerice ce va fi utilizat pentru experimentări, în măsurarea formelor și dimensiunilor filierei de extrudare și apoi de prelucrare a acestora pe suprafața dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic.

**Stabilirea zonei optime de amplasare a planului de extrudare și verificarea funcționării ansamblului ultrasonic imersat în medii vâscoase.** La alegerea planului în care se realizează injectarea-extrudarea au stat testele experimentale de laborator. Acestea au constat în folosirea unor medii de vâscozitate apropiată de cea a materialelor polimerice în stare de topitură și verificarea comportamentului acestora sub influența ultrasunetelor.

Pe măsură ce capul ansamblului ultrasonic a fost imersat progresiv în mediul vâscos s-a observat că intensitatea ultrasunetelor la vârful sonotrodei este ușor diminuată, iar frecvența de rezonanță s-a modificat ușor în sensul scăderii acesteia.

Se poate afirma că imersarea ansamblului ultrasonic în mediul fluid peste anumite valori conduce la reducerea efectelor ultrasunetelor și cu cât ne apropiem de zona nodală efectele de suprafață ale ultrasunetelor sunt tot mai neînsemnate.

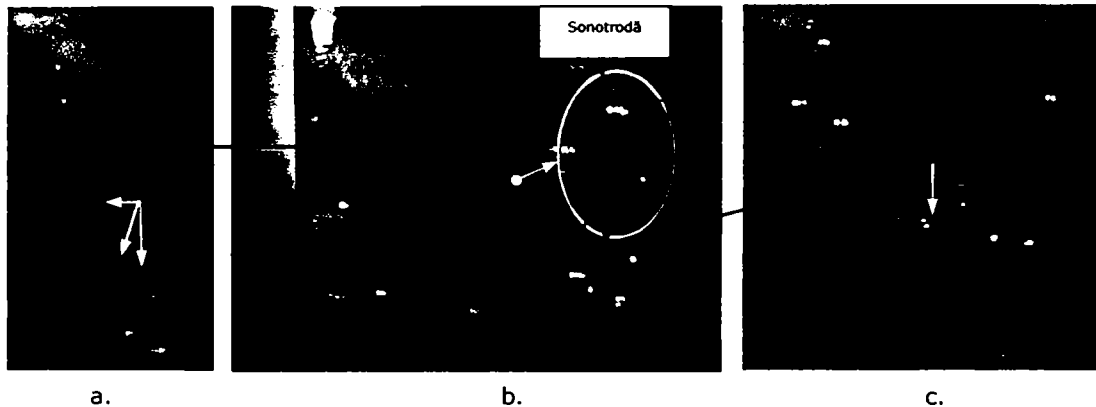
Generatorul de ultrasunete folosit trebuie să fie capabil să genereze puteri de peste 100W pentru a compensa amortizarea ultrasunetelor la imersarea în mediul polimeric în stare de topitură.

Duza capului de extrudare a fost construită din cupru de puritate 99,9% întrucât se știe că acesta este caracterizat de un transfer termic foarte bun și deoarece în această zonă se dorește a se aduce un aport termic suplimentar în vederea analizării comportamentului materialului polimeric, în stare de topitură, la ieșirea din dispozitiv, pentru diferite aporturi de temperatură aplicate asupra duzei. De asemenea, cercetările bibliografice au scos în evidență că materialul polimeric curge mai bine printr-o duză de cupru sau sticlă, comparativ cu una din aluminiu sau alte materiale.

**Punerea în evidență a efectului ultrasonic termopelicular.** Pentru punerea în evidență a efectului ultrasonic termopelicular se folosește tot varianta imersării ansamblului ultrasonic în mediu vâscos. Se dorește observarea efectelor ce se produc la nivelul zonei conice și a zonei de vârf a sonotrodei imersată în mediu vâscos pe durata activării cu ultrasunete.

În figura 6.24.b se poate observa capul sonotrodei imersat în mediul vâscos, iar în figura 6.24.a și 6.24.c se observă detalii cu privire la efectul ultrasunetelor asupra mediului vâscos la nivelul zonei laterale (efectul ultrasonic termopelicular) și respectiv frontale (efectul maxim al amplitudinii) a sonotrodei imersată în mediul vâscos. Se observă în figura 6.24.a că la nivelul suprafeței laterale a sonotrodei fluidul este împins către exterior și totodată concentrat spre zona de vârf a sonotrodei, iar la nivelul zonei frontale a sonotrodei se observă doar o concentrare a fluidului pe direcție longitudinală. Aceste efecte se pot explica prin faptul că în cadrul activării cu ultrasunete pe direcția longitudinală, pe lângă deplasarea principală a

undelor ultrasonice pe direcție longitudinală ( $A_L$ ) mai există și o deplasare de intensitate mai redusă pe direcția transversală ( $A_T$ ), aceasta din urmă nu permite fluidului să adere la suprafața sonotrodei. Rezultanta celor două microvibrații ( $R$ ) face ca fluidul să nu adere la suprafața conică a sonotrodei și să fie accelerat spre zona de vârf a acesteia. De asemenea, la nivelul întregii mase de fluid activată cu ultrasunete s-a constatat o creștere a temperaturii ca urmare a microvibrațiilor. Ca urmare a celor prezentate anterior putem spune că în timpul procesului de activare în medii vâscoase se produce la nivelul zonei laterale a sonotrodei atât efectul de alunecare a fluidului cât și un efect termic, de încălzire a mediului vâscos activat. Aceste efecte sunt cunoscute sub denumirea de *efect ultrasonic termopelicular*.



**Figura 6.24.** Verificarea funcționării ansamblului ultrasonic imersat în medii vâscoase cu punerea în evidență a efectului ultrasonic termopelicular

#### 6.4.1.2. Proiectarea-simularea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul etapei de concepție s-a trecut la proiectarea digitală a formelor și dimensiunilor elementelor ce compun dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice folosind programe software dedicate.

După obținerea formelor și dimensiunilor elementelor ce alcătuiesc dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic, se simulează asamblarea acestora în vederea descoperirii eventualelor imperfecțiuni de asamblare-funcționare datorate etapei de concepție-proiectare. Forma asamblată a dispozitivului ansamblului ultrasonic, obținută în urma etapei de concepție și proiectare folosind programe soft-ware dedicate este prezentată în figura 6.25.

În alcătuirea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic intră:

- ansamblul ultrasonic alcătuit din transductor-booster-sonotrodă (1);
- carcasa superioară - dural (2);
- carcasa inferioară - dural (3);
- duza capului de extrudare - cupru 99,9% (4).

Pe lângă aceste elemente, în alcătuirea dispozitivului mai intră și șuruburile de fixare ale carcasei superioare de cea inferioară, respectiv de fixare a duzei de extrudare de carcasa inferioară.

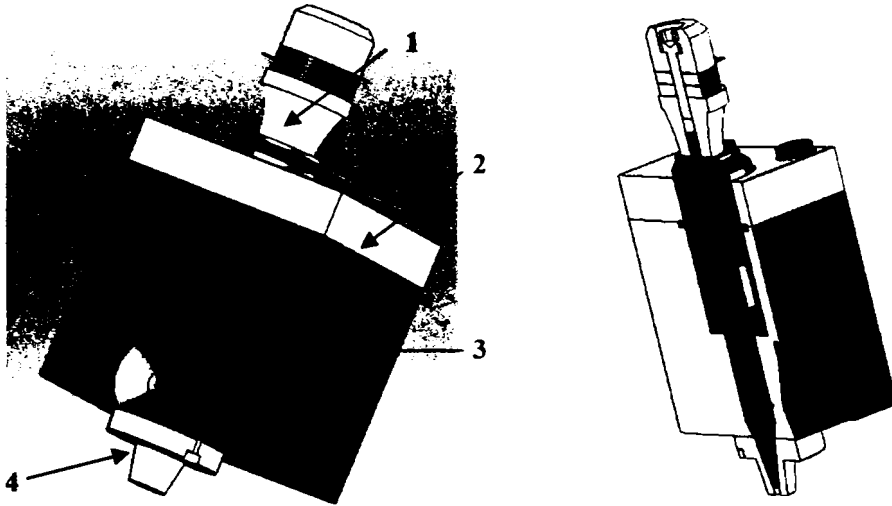


Figura 6.25. Dispozitiv de activare medii polimerce cu US

#### 6.4.1.3. Prelucrarea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe centre de prelucrare cu CNC

Elementele din componența dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic, mai sus menționate au fost concepute și proiectate cu ajutorul unor programe speciale de proiectare. După etapa de proiectare s-a realizat simularea prelucrărilor și prelucrarea elementelor componente pe mașini cu comandă numerică, obținându-se astfel formele finale ale elementelor ce alcătuiesc dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic. În figura 6.26. se prezintă mașina cu comandă numerică folosită cât și sculele și dispozitivele ce au fost folosite în vederea realizării relucrărilor.

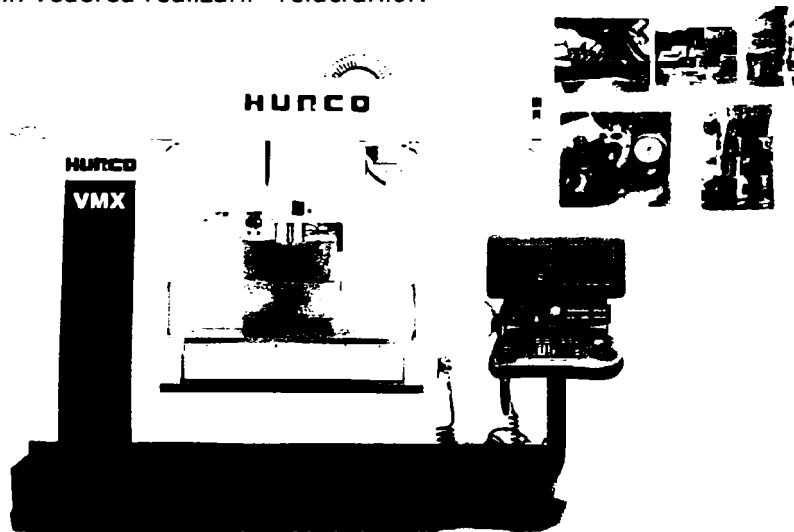


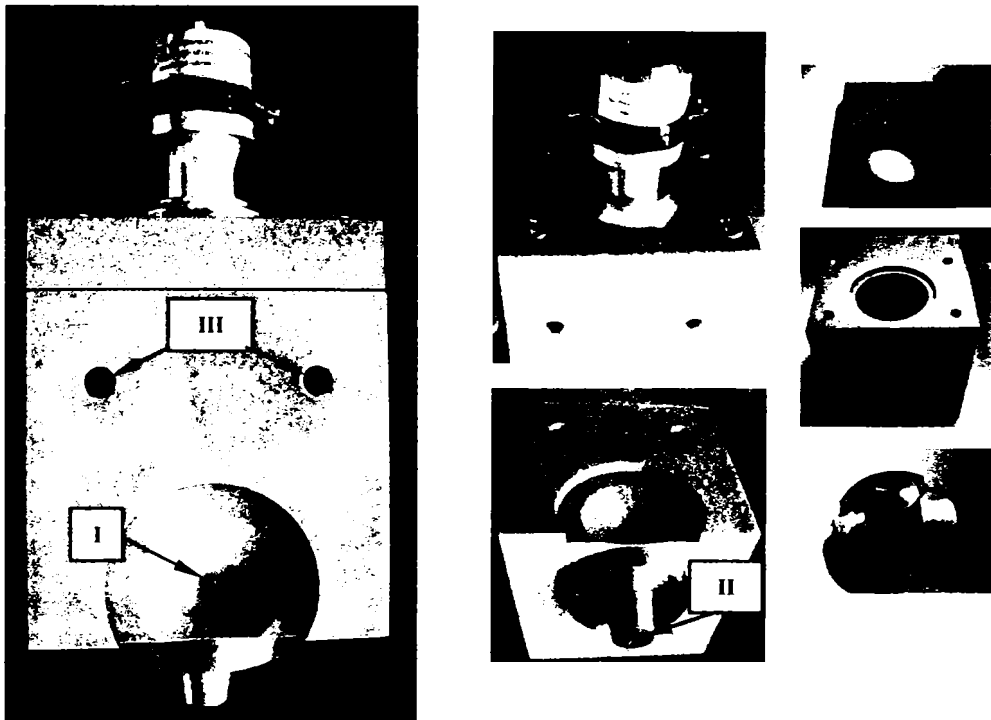
Figura 6.26. Centru de prelucrare cu comandă numerică [CIS 01]

Forma programelor de prelucrare pe mașina cu comandă numerică folosită la prelucrarea corpurilor ce alcătuiesc dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic este prezentată în anexa A5. Se prezintă etapele de prelucrare, începând de la operația de găurire și până la finisare.

În urma prelucrării pe mașina cu CNC se obțin formele finale ale elementelor ce alcătuiesc dispozitivul ansamblului ultrasonic (figura 6.27.). Traseul de curgere a materialului polimeric a fost prelucrat la rugozitatea de  $1,6\mu\text{m}$ , corespunzătoare operației de rectificare, în vederea asigurării unei curgeri cât mai line a materialului ce străbate canalul de injectare-extrudare din dispozitiv. Restul suprafețelor au fost prelucrate la o rugozitate de  $3,2\mu\text{m}$ , corespunzătoare operației de finisare. După prelucrarea componentelor pe CNC, suprafețele exterioare ale dispozitivului de curgere și instalare au fost supuse operației de sablare în vederea curățării.

În figura 6.27. se prezintă structura asamblată a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic cu evidențierea elementelor ce intră în alcătuirea dispozitivului. De asemenea, sunt evidențiate zona orificiului de injectare-extrudare de material (zona I), zona de ieșire a materialului după traversarea canalului de curgere a ansamblului ultrasonic (zona II) și respectiv zona de prindere și centrare a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe mașina de injectare-extrudare (zona III).

Ansamblul ultrasonic a fost fixat cu șuruburi în carcasa dispozitivului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice și s-a testat cu aparatură specializată buna funcționare a acestuia la frecvența de rezonanță.



**Figura 6.27.** Dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic folosit la activarea cu ultrasunete a curgerii mediilor polimerice

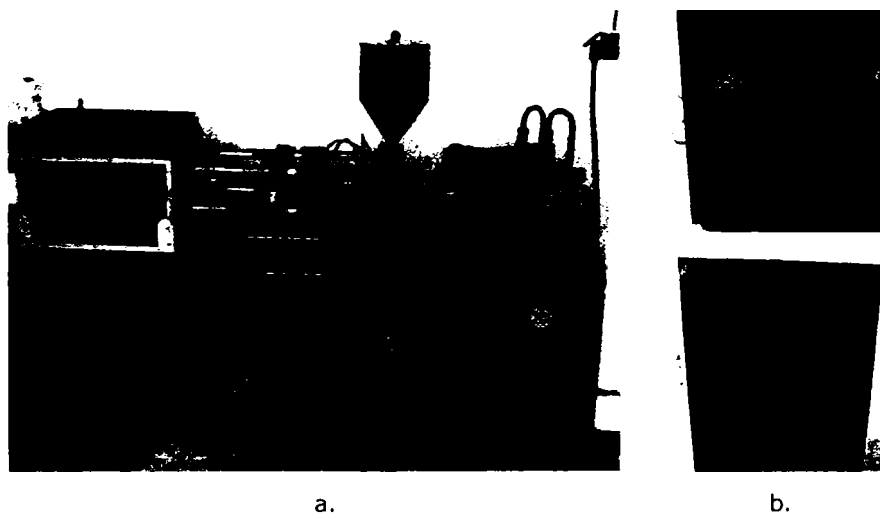
#### 6.4.1.4. Asamblarea și verificarea funcțională a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic la activarea cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice

În urma prelucrării pe mașini cu CNC s-au obținut elementele dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic. Acestea au fost verificate din punct de vedere al calității prelucrărilor, al asamblării și testării din punct de vedere funcțional. S-au testat atât modul de centrare și etanșare dintre ansamblul ultrasonic și elementele dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic cât și cele dintre elementele asamblate ale dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic.

De asemenea, s-a testat funcționarea la rezonanță a ansamblului ultrasonic în urma fixării în dispozitiv, respectiv modul de instalare a acestuia pe mașina de injectare-extrudare.

#### 6.4.2. Echipamentul de injectare-extrudare a materialelor polimerice. Montarea și testarea dispozitivului ultrasonic

După realizarea ansamblului ultrasonic, respectiv a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic, în vederea analizării comportamentului topiturilor materialelor polimerice activate cu ultrasunete s-a folosit o mașină de injectare-extrudare ENGEL, de tip ESMA-SCH-10/20, cu un singur melc cu piston (figura 6.28.).



**Figura 6.28.** Echipament de extrudare-injectare polimeri, tip ENGEL ESMA-Sch-10/20  
**a.** vedere de ansamblu; **b.** panou de comandă

În alcătuirea acestui echipament intră două unități:

- unitatea de injectare alcătuită din:
  - buncăr de alimentare;
  - melc piston (șnec);
  - cilindru de injectare-extrudare încălzit;
  - senzori de reglare a cursei de lucru;

- sistem de acționare hidraulic.
- unitatea de închidere;
- tablou de comandă.

Unitatea de injectare are următoarele roluri:

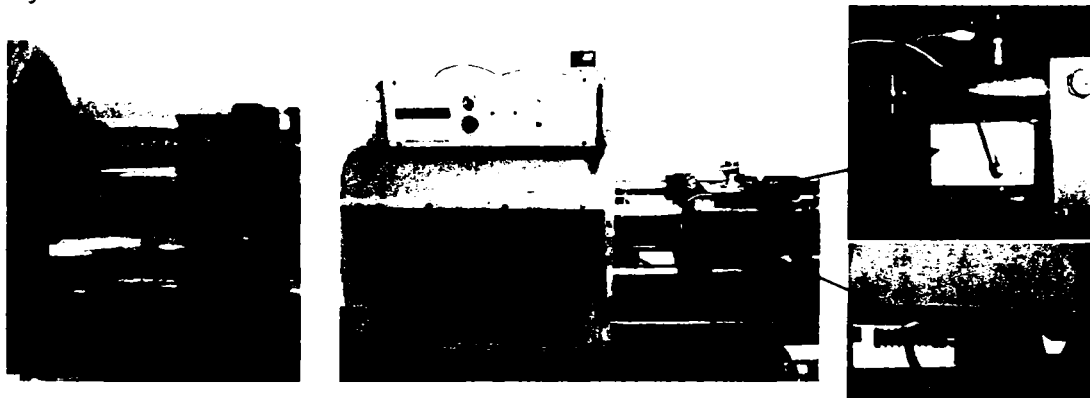
- asigură alimentarea cu material a cilindrului de extrudare;
- asigură plastifierea materialului polimeric cu posibilitatea de reglare și monitorizare a temperaturii în două zone ale cilindrului de extrudare;
- asigură alimentarea dispozitivului cu material polimeric în stare de topitură.

Unitatea de închidere are rolul de apropiere a platourilor în vederea fixării dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice.

De la tabloul de comandă se pot regla parametri de proces, temperatura mediului polimeric în cele două zone ale cilindrului de extrudare în intervalul 0°C - 300°C, viteza și presiunea prin filiera de extrudare etc.

De asemenea, echipamentul este prevăzut cu două semimatrițe amplasate pe platoul fix, respectiv pe platoul mobil. În vederea obținerii standului experimental de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice în stare de topitură s-au demontat și înlocuit semimatrițele (figura 6.29.a) cu dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic de activare a curgerii materialelor polimerice (figura 6.29.b).

În figura 6.29.c se pune în evidență modul de amplasare a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe mașina de injectare-extrudare, respectiv modul de amplasare a senzorilor de temperatură. În urma etapelor de concepție-proiectare-prelucrare corect alese, dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic a fost montat fără probleme pe mașina de extrudare-injectare.



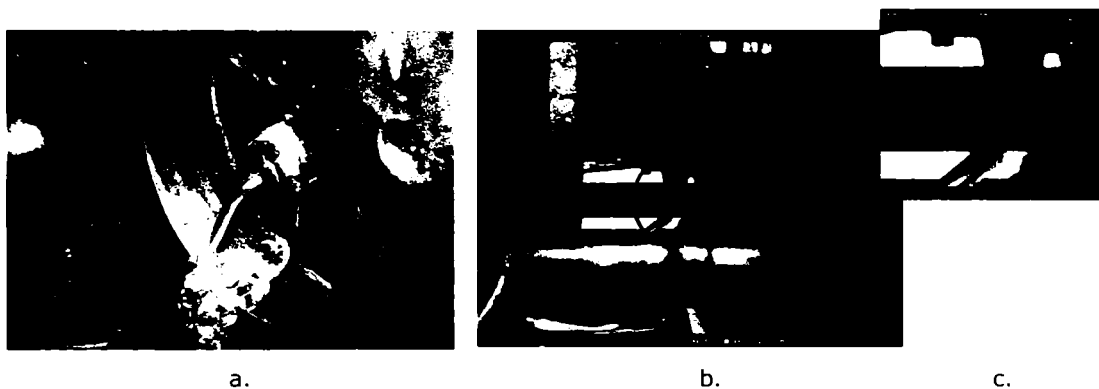
a.

b.

c.

**Figura 6.29.** Modul de amplasare a dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe mașina de injectare-extrudare

Testarea echipamentului s-a realizat atât ca entitate separată – mașină de injectare-extrudare – (figura 6.30.a), cât și ca echipament nou obținut, stand de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice în stare de topitură (figura 6.30.b). În figura 6.30.c se prezintă în detaliu curgerea materialului polimeric în stare de topitură în zona de ieșire din duza de extrudare a dispozitivului ansamblului ultrasonic. De asemenea, s-a testat funcționarea la rezonanță a ansamblului ultrasonic după instalarea dispozitivului pe mașina de injectare-extrudare.



**Figura 6.30.** Testarea echipamentelor folosite în cadrul cercetării

### 6.4.3. Testarea generatorului de ultrasunete

Așa cum s-a prezentat anterior, generatorul construit în cadrul acestei aplicații este de construcție specială, asigură o putere maximă transmisă la transductorul piezoceramic de 150 W și lucrează la o frecvență reglabilă în domeniul 38.000 – 39.200 Hz.

Realizarea unui generator de ultrasunete care să asigure o putere de 150W a venit în urma rezultatelor cercetărilor experimentale efectuate cu un generator ce realiza o putere de 50W și la care s-a observat că, în timpul procesului de activare cu ultrasunete a curgerii topiturii materialelor polimerice, efectul ultrasunetelor este nesemnificativ.

De asemenea, frecvența de rezonanță a generatorului de ultrasunete construit este inferioară frecvenței de rezonanță a ansamblului ultrasonic la temperatura mediului ambiant. Decizia de a construi generatorul astfel încât acesta să lucreze în intervalul de frecvență 38.000 – 39.200 Hz este dictată și justificată de cercetările experimentale privind:

- modul cum variază frecvența de rezonanță cu temperatura întrucât ansamblul ultrasonic trebuie să lucreze la temperaturi de până la aproximativ 250 - 300°C;
- modul cum variază frecvența de rezonanță în contact cu mediul polimeric în stare de topitură, în timpul procesului de curgere.

În urma căror cercetări s-a observat că în timpul procesului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice, ca urmare a factorilor prezentați anterior (temperatura, presiunea și vâscozitatea mediului de lucru), frecvența de rezonanță a ansamblului ultrasonic scade până la valori de 38.000Hz.

În vederea unei certitudini cu privire la păstrarea permanentă a frecvenței de rezonanță și determinarea modului cum variază impedanța acustică, pe tot parcursul procesului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice se folosește echipamentul portabil de măsurare a frecvenței de rezonanță și impedanței ansamblului ultrasonic ce a fost prezentat anterior. În funcție de valorile obținute cu acest echipament se fac reglajele la generatorul de ultrasunete astfel încât să existe siguranța că, în timpul procesului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice, ne aflăm la rezonanță.

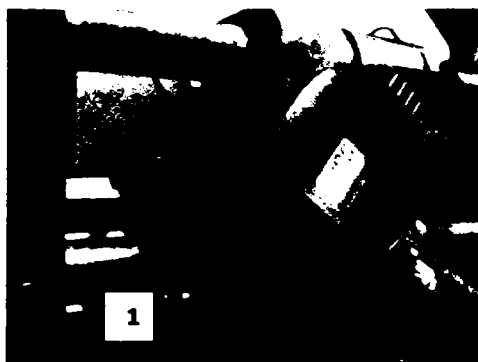
## 6.5. Stabilirea elementelor de caracterizare a experimentului de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice

### 6.5.1. Stabilirea și monitorizarea intervalului temperaturii de lucru

Tinând cont de materialele polimerice ce urmează a fi folosite pentru experimentare, cu și fără activare ultrasonică, intervalul de temperaturi de extrudare la care se realizează procesarea materialelor polimerice variază în intervalul  $160 \div 220^{\circ}\text{C}$ . Aceste temperaturi sunt realizate în cilindrul extruderului prin două zone de încălzire și monitorizare a temperaturii de-a lungul extruderului.

Pentru realizarea cercetărilor de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice nu este însă suficientă doar încălzirea polymerului în cilindrul extruderului ci este necesară realizarea unei încălziri pe tot traseul parcurs de topitura de polimer până la ieșirea din duza de extrudare. Cu alte cuvinte, este necesară și încălzirea atât a dispozitivului de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic, dar și a duzei de ieșire.

Când extrudarea se realizează fără încălzirea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic, pentru a evita formarea de dopuri (sigilare a canalului de curgere), este necesară folosirea unor presiuni de extrudare și viteze de curgere ridicate. Folosirea acestor presiuni ne împiedică să observăm posibilele efecte ale activării ultrasonice. Pentru a putea pune în evidență efectele ultrasunetelor, de creștere a debitului de material extrudat și de ameliorare a calității extrudatului și chiar eliminare a posibilelor defecte ce pot apare în procesul de extrudare, este necesară folosirea unor viteze de curgere și presiuni de extrudare mult reduse, valori la care apare fenomenul de sigilare a interstițiului de curgere. Pentru a evita apariția sigilării canalului de extrudare se procedează la încălzirea duzei și a dispozitivului de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic. Pentru aceasta se va folosi un generator de aer cald (1) a cărei temperatură poate fi reglabilă în intervalul  $50 - 600^{\circ}\text{C}$  (figura 6.31.).



**Figura 6.31.** Echipament de încălzire duză-dispozitiv ansamblu ultrasonic

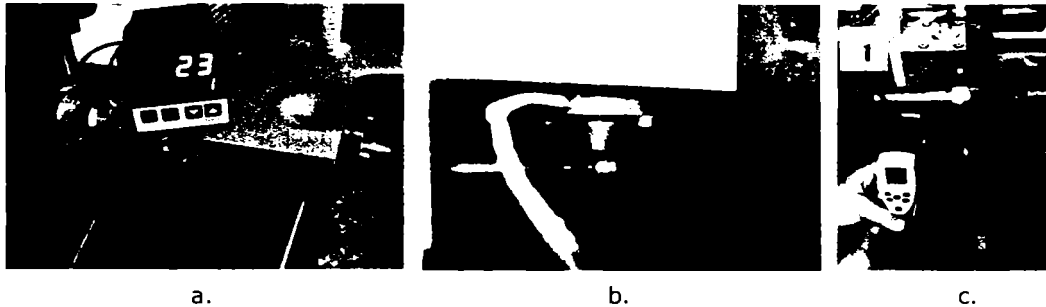
Monitorizarea modului cum variază temperatura la nivelul extruderului, dispozitivului ansamblului ultrasonic și a duzei de extrudare s-au realizat folosind elemente de tip senzori de temperatură conectați la un afișor digital.



De asemenea, temperatura poate fi măsurată folosind un echipament cu fasciculul laser.

Temperatura de procesare a polimerului este unul dintre factorii importanți ce urmează a fi analizați în cadrul experimentărilor, motiv pentru care este esențial ca pe tot parcursul procesului de extrudare-injectare, cu și fără ultrasunete, să se poată monitoriza temperatura atât la nivelul cilindrului extruderului cât și la nivelul dispozitivului ansamblului ultrasonic, dar și la nivelul duzei de extrudare.

Monitorizarea temperaturii în cilindrul extruderului este realizată în două zone cu ajutorul a două termocuple, iar la nivelul dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic se realizează atât prin folosirea unor termocuple cât și cu laser.



**Figura 6.32.** Echipamente de monitorizare a temperaturii duzei și dispozitivului

Pentru a deține informații cu privire la modul cum variază temperatura în zona planului de extrudare a materialului în dispozitiv (figura 6.32.a) și la ieșire din acesta, în zona duzei de extrudare (figura 6.32.b), au fost realizate alezaje în care s-au montat elemente de tip senzori de temperatură conectați la un afișor digital. De asemenea, temperatura poate fi măsurată folosind un echipament cu fasciculul laser (figura 6.32.c).

### **6.5.2. Stabilirea ordinului de mărime pentru presiunea de extrudare**

Pentru a putea scoate cât mai bine în evidență eventualele efecte de creștere a debitului de material polimeric în stare de topitură extrudat în condițiile activării cu ultrasunete este de preferat a se lucra la valori cât mai mici ale presiunii de extrudare și implicit ale debitului de material extrudat în unitatea de timp. Mașina de extrudare-injectare folosită permite reglarea presiunii de extrudare în intervalul  $0 \div 500 \text{ kg/cm}^2$ . În urma testelor de laborator ce au avut în vedere urmărirea creșterii de debit ca urmare a modificării presiunii se alege ca interval de presiune  $5 \div 10$  bari, presiune la care este posibilă punerea în evidență a efectelor ultrasunetelor asupra extrudatului de polimer.

### **6.5.3. Stabilirea volumului cilindrului extruderului și a timpului de extrudare**

Instalația de extrudare-injectare s-a ales astfel încât să poată realiza o cantitate suficientă de material extrudat pe toată durata pe care se desfășoară încercările experimentale. Experimentările constau în măsurarea cantității de

material polimeric injectat în timpul de 15s atât pentru cazul fără activare cu ultrasunete cât și pentru cazul în care topitura de polimer este activată ultrasonic.

Testele de laborator efectuate pe mașina de injectare-extrudare Engel au arătat că mașina este capabilă să realizeze un debit suficient și constant pe toată durata experimentărilor.

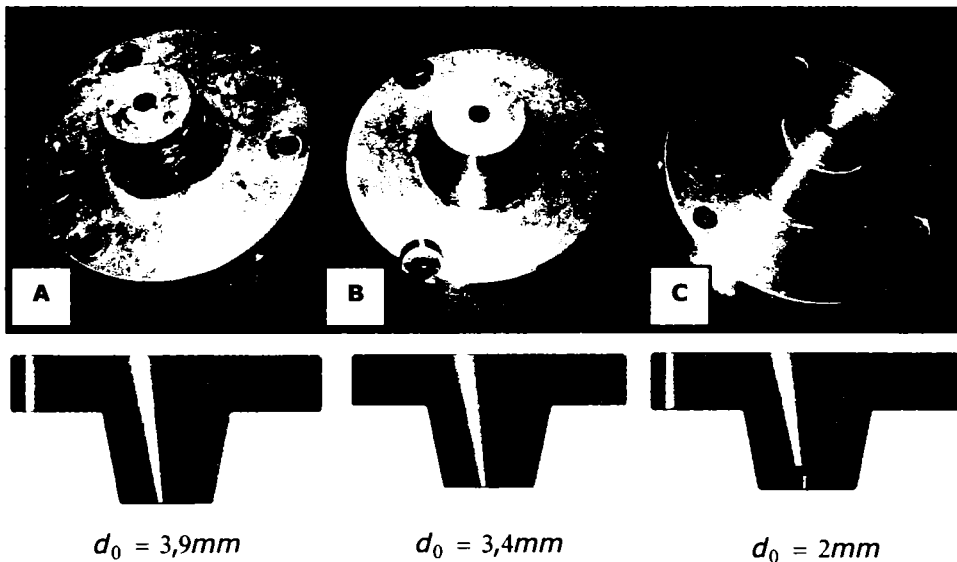
#### 6.5.4. Stabilirea limitelor dimensionale ale interstițiului de curgere și a geometrie duzei de extrudare

La concepția și realizarea duzelor de activare s-au avut în vedere efectele posibile ale ultrasunetelor asupra topiturii de polimer, în special de aport termic în procesul de activare și de alunecare a polimerului în imediata vecinătate a sonotrodei, efecte întâlnite sub denumirea de *efect ultrasonic termopelicular*, cât și efectul maxim al amplitudinii în zona de vârf a sonotrodei. Aceste efecte pot conduce la efecte de creștere a debitului de material polimeric în zona de ieșire din duză.

În vederea studierii comportamentului de curgere a materialelor polimerice cu și fără activare cu ultrasunete, au fost concepute, proiectate și materializate un număr de trei duze de extrudare realizate din cupru de puritate 99,9%.

De asemenea, pentru a beneficia de o curgere cât mai lină a materialului polimeric prin interstițiul de curgere, suprafețele ce intră în contact cu polimerul în stare de topitură au fost prelucrate mecanic prin rectificare la rugozitatea de  $1,6\mu\text{m}$ .

Diametrul de curgere a mediului polimeric în stare de topitură la ieșirea din duză ( $d_0$ ) are valori de 3,9mm (experiment de tip A), 3,4mm (experiment de tip B), respectiv 2mm (experiment de tip C), funcție de duza aleasă pentru experimentare (figura 6.33.).

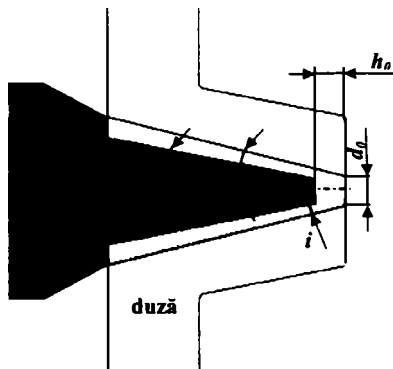


**Figura 6.33.** Set duze folosite la experimentare - geometria duzelor folosite

Duzele realizate prezintă avantajele unei montări – demontări foarte ușoare la nivelul dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic, respectiv permit înlăturarea rapidă a materialului polimeric solidificat pentru cazul când se

dorește realizarea unui set nou de încercări folosind alți parametri de regim sau altă duză de extrudare.

În figura 6.34. sunt prezentate configurația geometrică a capului de activare și elementele geometrice de caracterizare a acestuia.



$h_0$  – adâncimea de imersare a ansamblului ultrasonic în duză;

$$a = 1 \div 7 \text{ mm}$$

$d_0$  – diametrul de ieșire al duzei;

$$d_0 = 2 \div 3,9 \text{ mm}$$

$i$  – interstițiul de curgere la vârful sonotrodei;

$$i = 0,7 \div 3,5 \text{ mm}$$

$\alpha$  – unghiul de înclinare sonotrodă;

$$\alpha = 11^\circ$$

$\alpha_0$  – unghi de înclinare duză.

$$\alpha_0 = 14 \div 16^\circ$$

**Figura 6.34.** Configurația geometrică a capului de activare din dispozitiv

În vederea studierii comportamentului materialului polimeric prin interstiții de curgere variabile, cu și fără activare ultrasonică, interstițiul de cergere " $i$ " poate să varieze în intervalul de valori  $0,7 \div 3,5 \text{ mm}$ .



**Figura 6.35.** Inele cauciuc termorezistent folosite pentru experimentări

Obținerea acestor valori ale interstițiului de curgere pot fi obținute prin interschimbarea duzelor și/sau folosirea de inele din cauciuc termorezistent (figura 6.35.).

Funcție de utilizare, inelele au fost împărțite în două clase, figura 6.36.:

- inele de tip "a";
- și inele de tip "b".

Inelele din cauciuc termorezistent de tip "a" sunt aplicate într-un canal practicat în zona nodală a sonotrodei având ca scop realizarea unei bune centrări a ansamblului ultrasonic în dispozitivul de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic și de a împiedica eventuale deplasări de material polimeric aflat în stare de topitură spre booster.

Inelele din cauciuc termorezistent de tip "b" sunt de diferite grosimi și sunt plasate în zona de așezare a ansamblului ultrasonic (zona nodală booster) pe dispozitivul ansamblului ultrasonic. Prin folosirea unui anumit inel, de o anumită

grosime, se realizează un interstițiu de curgere "j" mai mare sau mai mic. De asemenea, prin folosirea acestor inele se modifică și adâncimea de imersare a ansamblului ultrasonic în duză "h<sub>0</sub>".

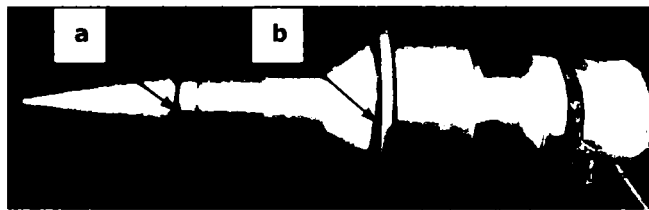


Figura 3.36. Amplasarea inelelor pe ansamblul ultrasonic

### 6.5.5. Stabilirea planului experimental

În cadrul programului experimental de cercetare se urmărește punerea în evidență a efectelor ultrasunetelor asupra curgerii materialelor polimerice în stare de topitură, în procesele de punere în formă prin extrudare-injectare. Se așteaptă ca, în cazul activării cu ultrasunete, datorită manifestării efectului ultrasonic termopelicular la nivelul zonei de contact a sonotrodei cu materialul polimeric în stare de topitură, să se producă o creștere a debitului de material extrudat la ieșirea din dispozitivul de curgere, respectiv o ameliorare a calității defectelor de curgere.

În cadrul cercetărilor experimentale s-au derulat trei seturi de încercări (experiment de tip A, experiment de tip B și experiment de tip C) în funcție de configurația duzei de extrudare. Pentru fiecare din aceste tipuri de duze s-au studiat efectele activării ultrasonice asupra curgerii topiturii materialului polimeric, efecte măsurate pentru valori crescătoare ale temperaturii (160°C, 190°C și 220°C).

În vederea derulării unui program de modelare matematică prin metoda celor mai mici pătrate, este necesar a se stabili funcțiile de intrare și funcțiile obiectiv ale programului experimental. Geometria duzei și temperaturile de experimentare reprezintă funcțiile de intrare ale experimentărilor, iar funcția obiectiv, care reflectă efectul activării ultrasonice în diferite condiții de lucru, este stabilită ca fiind creșterea relativă de debit, calculată cu relația:

$$\Delta Q = \frac{Q_{US} - Q}{Q} \cdot 100 [\%] \quad (6.1)$$

în care:  $Q_{US}$  - valoarea medie a debitului (cantitatea de material extrudat în unitatea de timp) pentru cazul activării cu ultrasunete;

$Q$  - valoarea medie a debitului obținută în condiții normale de procesare, fără activare cu ultrasunete.

De asemenea, tot ca mărime de răspuns este considerată și aspectul vizual al extrudatului în condiții de activare ultrasonică și fără activare ultrasonică.

## 6.6. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-a urmărit prezentarea datelor privind realizarea standului specializat de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice.

În vederea obținerii acestui echipament a fost necesară cunoașterea a două domenii ale științei, și anume:

- știința și tehnica ultrasunetelor;
- și ingineria polimerilor.

Astfel pentru obținerea standului experimental folosit la activarea curgerii materialelor polimerice cu ultrasunete au fost parcurse și realizate următoarele etape:

- concepția, proiectarea și realizarea elementelor ansamblului ultrasonic:
  - amplificator intermediar de undă (booster);
  - sonotrodă conică și exponențială.
- calibrarea la frecvența de rezonanță (40kHz) a elementelor ansamblului ultrasonic:
  - calibrare transductor;
  - calibrare amplificator adaptor de undă – booster;
  - calibrare sonotrodă.
- realizarea la ISIM Timișoara a generatorului de ultrasunete (40kHz) de construcție specială și adaptarea constructiv-funcțională a acestuia la variațiile frecvenței ansamblului ultrasonic;
- determinarea pe cale experimentală a elementelor de caracterizare a ansamblului ultrasonic;
- determinarea pe cale experimentală a modului cum variază frecvența de rezonanță funcție de temperatură;
- concepția și realizarea elementelor dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic folosind prelucrarea pe mașini cu comandă numerică;
- adaptarea dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic pe mașina de extrudare-injectare și verificarea funcționalității echipamentului nou realizat;
- stabilirea echipamentelor folosite pentru experimentare cu privire la:
  - modul cum variază impedența și frecvența de rezonanță în procesul de extrudare cu ultrasunete;
  - modul cum se realizează încălzirea la nivelul dispozitivului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic și duzei de extrudare;
  - modul de monitorizare a temperaturii la nivelul extruderului, dispozitivului ansamblului de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic și la nivelul duzei de extrudare.

# CAPITOLUL VII

## CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ACTIVAREA CU ULTRASUNETE A CURGERII TOPITURII MATERIALELOR POLIMERICE

### 7.1. Material pentru experimentare

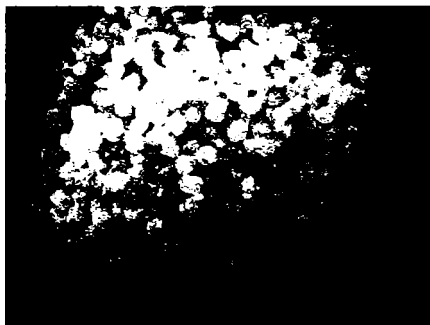
În vederea realizării experimentărilor de activare cu ultrasunete a curgerii materialelor polimerice, se va folosi materialul "*polietilenă de înaltă densitate (HDPE) – 2200J*" frecvent utilizat în tehnică.

Analizând declarația de conformitate primită la livrarea produsului HDPE 2200J se pot spune următoarele:

- produsul nu este toxic;
- nu conține urme de metale grele;
- nu este radioactiv;
- este reciclabil.

Produsul nu este clasificat ca și periculos conform Directivei 67/548/EEC și prepararea nu este clasificată ca și periculoasă, conform Directivei 1999/45/EEC. Produsul este conform cerințelor Directivei 2004/19/EEC (amendată prin Directiva 2002/72/EEC) referitoare la materialele și obiectele din material plastic, destinate a veni în contact cu produsele alimentare.

De asemenea, produsul nu pune în pericol viața, sănătatea, securitatea muncii, nu produce un impact negativ asupra mediului, în condițiile în care este utilizat conform fișei tehnice de securitate și specificației/standardului nr. 74 – 2/1/05.02.2008. Sistemul de calitate al produsului este certificat în conformitate cu standardele DIN EN ISO 9001:2000 și DIN EN ISO 14001:1996.



**Figura 7.1.** Granule polimerice din HDPE – 2200J

Granulele polimerice virgine arată ca în figura 7.1., iar caracteristicile materialului HDPE – 2200J, în conformitate cu raportul de încercare realizat de producător sunt prezentate în tabelul 7.1.

**Tabelul 7.1.** Elementele de caracterizare ale materialului HDPE – 2200J

Nr.	Caracteristica	Metoda de încercare	UM	Valoarea prevăzută	Valoarea determinată
1	Aspect	Vizual	-	Granule cilindrice sau paralelipipedice h-max. 6mm. Se admit max. 7% granule cu aspect necorespunzător	Granule de dimensiuni și culoare uniformă, cu 0,002% gr contaminate
2	Indice de curgere (190°C, 2.16kg)	ISO 1133B	g/10min	min. 4 max. 6	5,32
3	Densitatea la 23°C	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	min. 0,963 max. 0,967	0,9663
4	Conținutul de cenușă	ASTM D5830	%m/m	max. 0,08	0,034
5	Conținutul de volatile în polimer prin metoda headspace	ASTM D4526	%m/m	max. 0,08	0,035
6	Rezistența la limita de curgere (23°C, v-50mm/min)	ISO 527/1,2	MPa	min. 22	26,60
7	Alungirea la limita de curgere (23°C, v-50mm/min)	ISO 527/1,2	%	min. 8	8,72
8	Rezistența la șoc IZOD (23°C, specimen crestat)	ISO 180/1A	KJ/m <sup>2</sup>	min. 4,00	5,99
9	ESCR (F50, IGEPAL 10%, 50°C,)	ASTM D1693	ore	min. 4	6
10	Punct de înmuiere VICAT (A.50°C/h. 10N)	ISO 306/A	°C	min. 115	125,3

Se vor realiza studii experimentale cu și fără activare ultrasonică pentru trei tipuri de experimente (experiment de tip A, B și C) la valori ale temperaturilor de 160°C, 190°C și 220°C:

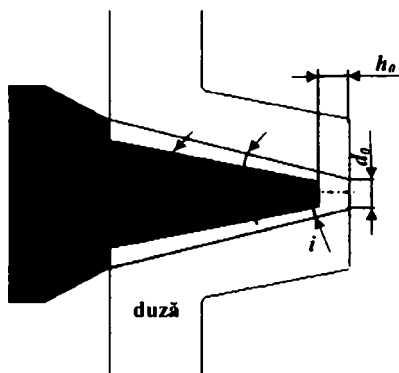
- experiment de tip A -  $i = 1,2\text{mm}$  ;  $h_0 = 3,7\text{mm}$  ;  $d_0 = 3,9\text{mm}$  ;
- experiment de tip B -  $i = 0,7\text{mm}$  ;  $h_0 = 3,3\text{mm}$  ;  $d_0 = 3,4\text{mm}$  ;
- experiment de tip C -  $i = 1\text{mm}$  ;  $h_0 = 4,5\text{mm}$  ;  $d_0 = 2\text{mm}$  ;

Pentru fiecare dintre experimente se vor realiza teste ce vor pune în evidență modul cum influențează activarea cu ultrasunete asupra debitului de material extrudat și ameliorării calității extrudatului la nivelul suprafeței polimerului, dar și la nivelul structurii interne a acestuia (eventuale transformări de fază).

### Experiment de tip A. Cercetări experimentale privind extrudarea materialului HDPE cu și fără activare ultrasonică

Experimentul de tip A a constat în folosirea duzei de tip A, caracterizată de (figura 7.2.):

- interstițiu de curgere  $i = 1,2\text{mm}$  ;
- distanța de retragere a ansamblului ultrasonic în duza de extrudare  $h_0 = 3,7\text{mm}$ ;
- diametrul duzei de extrudare  $d_0 = 3,9\text{mm}$ .



$h_0$  - adâncimea de imersare a blocului sonic în duză;

$$h_0 = 3,7\text{mm}$$

$d_0$  - diametrul de ieșire al duzei;

$$d_0 = 3,9\text{mm}$$

$i$  - interstițiul de curgere la vârful sonotrodei;

$$i = 1,2\text{mm}$$

$\alpha$  - unghiul de înclinare sonotrodă;

$$\alpha = 11^\circ$$

$\alpha_0$  - unghi de înclinare duză.

$$\alpha_0 = \div 6$$

**Figura 7.2.** Configurația geometrică a duzei de extrudare pentru experimentul de tip A

Încercările s-au efectuat pentru trei valori ale temperaturii de extrudare a materialului polimeric (160°C, 190°C și 220°C), iar rezultatele experimentale obținute în urma cercetării, precum și imaginile corespunzătoare fiecărui tip de experiment sunt prezentate în anexa A7.

Ca și elemente de caracterizare a cercetării folosind duza de tip A, amintim următoarele:

**Factori de răspuns:** debitul de material extrudat pentru cazul:

- fără activare ultrasonică ( $Q$ );
- cu activare ultrasonică ( $Q_{US}$ ).

**Temperatura în cilindru extruderului:**

- $T_1 = 150 \div 170^\circ\text{C}$  - temperatura în zona I de încălzire a cilindrului de extrudare;
- $T_2 = 160 \div 220^\circ\text{C}$  - temperatura în zona II de încălzire a cilindrului de extrudare.

**Frecvența de rezonanță și impedanța ansamblului ultrasonic la temperatura mediului ambiant:**

- $F = 39,792\text{kHz}$  ;
- $Z_S = 40\Omega$  .

**Frecvența de rezonanță și impedanța ansamblului ultrasonic montat în blocul sonic, la temperatura ambiantă:**

- $F = 39,753\text{kHz}$  ;
- $Z_S = 95\Omega$  .

**Aport termic la nivelul duzei de extrudare:**  $T_d = 140^\circ\text{C}$

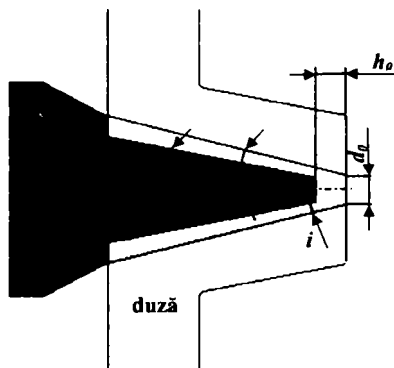


**Presiunea de extrudare:**  $p = 6 \text{ kg} / \text{cmm}^2 = 5,88 \text{ bari}$

**Experiment de tip B. Cercetări experimentale privind extrudarea materialului HDPE cu și fără activare ultrasonică**

Experimentul de tip B a constat în folosirea duzei de tip B, caracterizată de (figura 7.3.):

- interstițiu de curgere  $i = 0,7 \text{ mm}$  ;
- distanța de retragere a ansamblului ultrasonic în duza de extrudare  $h_0 = 3,3 \text{ mm}$ ;
- diametrul duzei de extrudare  $d_0 = 3,4 \text{ mm}$ .



$h_0$  – adâncimea de imersare a blocului sonic în duză;

$$h_0 = 3,3 \text{ mm}$$

$d_0$  – diametrul de ieșire al duzei;

$$d_0 = 3,4 \text{ mm}$$

$i$  – interstițiul de curgere la vârful sonotrodăi;

$$i = 0,7 \text{ mm}$$

$\alpha$  – unghiul de înclinare sonotrodă;

$$\alpha = 11^\circ$$

$\alpha_0$  – unghi de înclinare duză.

$$\alpha_0 = \div 6^\circ$$

**Figura 7.3.** Configurația geometrică a duzei de extrudare pentru experimentul de tip B

Încercările s-au efectuat pentru trei valori ale temperaturii de extrudare a materialului polimeric (160°C, 190°C și 220°C), iar rezultatele experimentale obținute în urma cercetării, precum și imaginile corespunzătoare fiecărui tip de experiment sunt prezentate în anexa A8. Ca și elemente de caracterizare a cercetării folosind duza de tip B, amintim următoarele:

**Factori de răspuns:** debitul de material extrudat pentru cazul:

- fără activare ultrasonică ( $Q$ );
- cu activare ultrasonică ( $Q_{US}$ ).

**Temperatura în cilindru extruderului:**

- $T_1 = 150 \div 170^\circ\text{C}$  - temperatura în zona I de încălzire a cilindrului de extrudare;
- $T_2 = 160 \div 220^\circ\text{C}$  - temperatura în zona II de încălzire a cilindrului de extrudare.

**Frecvența de rezonanță și impedanța ansamblului ultrasonic la temperatura mediului ambiant:**

- $F = 39,792 \text{ kHz}$  ;
- $Z_S = 40 \Omega$  .

**Frecvența de rezonanță și impedanța ansamblului ultrasonic montat în blocul sonic, la temperatura ambiantă:**

- $F = 39,805 \text{ kHz}$  ;
- $Z_S = 95 \Omega$  .

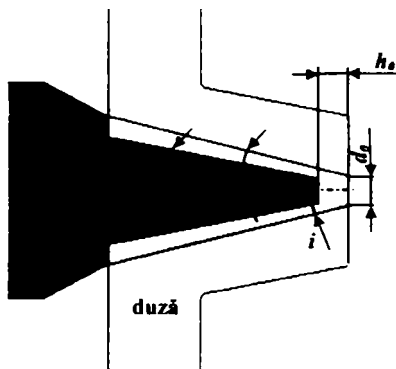
**Aport termic la nivelul duzei de extrudare:**  $T_d = 150^\circ\text{C}$

**Presiunea de extrudare:**  $p = 6\text{kg/cm}^2 = 5,88\text{bari}$

**Experiment de tip C. Cercetări experimentale privind extrudarea materialului HDPE cu și fără activare ultrasonică**

Experimentul de tip C a constat în folosirea duzei de tip C, caracterizată de (figura 7.4.):

- interstițiu de curgere  $i = 1\text{mm}$ ;
- distanța de retragere a ansamblului ultrasonic în duza de extrudare  $h_0 = 4,5\text{mm}$ ;
- diametrul duzei de extrudare  $d_0 = 2\text{mm}$ .



$h_0$  - adâncimea de imersare a vârfului sonotrodei în duză;

$$h_0 = 4,5\text{mm}$$

$d_0$  - diametrul de ieșire al duzei;

$$d_0 = 2\text{mm}$$

$i$  - interstițiul de curgere la vârful sonotrodei;

$$i = 1\text{mm}$$

$\alpha$  - unghiul de înclinare sonotrodă;

$$\alpha = 11^\circ$$

$\alpha_0$  - unghi de înclinare duză.

$$\alpha_0 = 14 \div 6^\circ$$

**Figura 7.4.** Configurația geometrică a duzei de extrudare pentru experimentul de tip C

Încercările s-au efectuat pentru trei valori ale temperaturii de extrudare a materialului polimeric ( $160^\circ\text{C}$ ,  $190^\circ\text{C}$  și  $220^\circ\text{C}$ ), iar rezultatele experimentale obținute în urma cercetării, precum și imaginile corespunzătoare fiecărui tip de experiment sunt prezentate în anexa A9. Ca și elemente de caracterizare a cercetării folosind duza de tip C, amintim următoarele:

**Factori de răspuns:** debitul de material extrudat pentru cazul:

- fără activare ultrasonică ( $Q$ );
- cu activare ultrasonică ( $Q_{US}$ ).

**Temperatura în cilindru extruderului:**

- $T_1 = 150 \div 170^\circ\text{C}$  - temperatura în zona I de încălzire a cilindrului de extrudare;
- $T_2 = 160 \div 220^\circ\text{C}$  - temperatura în zona II de încălzire a cilindrului de extrudare.

**Frecvența de rezonanță și impedanța ansamblului ultrasonic la temperatura mediului ambiant:**

- $F = 39,792\text{kHz}$ ;
- $Z_s = 40\Omega$ .

**Frecvența de rezonanță și impedanța ansamblului ultrasonic montat în blocul sonic, la temperatura ambiantă:**

- $F = 39,788\text{kHz}$ ;

- $Z_5 = 93\Omega$ .

**Aport termic la nivelul duzei de extrudare:**  $T_d = 140^\circ\text{C}$

**Presiunea de extrudare:**  $p = 6\text{kg/cm}^2 = 5,88\text{bari}$

## 7.2. Analiza rezultatelor și trasarea suprafețelor de răspuns prin metoda celor mai mici pătrate

**Tabelul 7.2.** Valorile grupate ale experimentărilor necesare interpretării rezultatelor pe baza metodei celor mai mici pătrate

Situatie	Geometria duzei	Temperatura de lucru [°C]	Debit fără activare ultrasonică, Q		Debit cu activare ultrasonică, Q <sub>us</sub>		Cresterea relativă de debit, ΔQ [%]	Δ calitate, ΔC
			Cantitate [g/sec]	Aspect vizual	Cantitate US [g/sec]	Aspect vizual US		
1.	A	160	12	3,33	14,41	4,33	20,75	1
2.	A	190	13,2	3,66	15,2	4,66	15,15	1
3.	A	220	14,4	5	15,5	4	7,63	-1
4.	B	160	9,54	3	12,45	4,66	30,5	1,66
5.	B	190	11,95	3,66	14,15	4,66	18,41	1
6.	B	220	12,93	4,66	14,65	3,66	13,3	-1
7.	C	160	11,97	3	14,8	4,33	23,64	1,67
8.	C	190	13,7	3,33	15,6	4,66	13,86	1,66
9.	C	220	13,94	5	15,65	4	12,26	-1

În vederea realizării interpretărilor rezultatelor cercetării și trasarea suprafețelor de răspuns folosind metoda celor mai mici pătrate a fost necesar a se stabili factorii de influență ai rezultatelor cercetării și factorii obiectiv ai cercetării. Datele necesare pentru interpretare sunt prezentate în tabelul 7.2.

Observații:

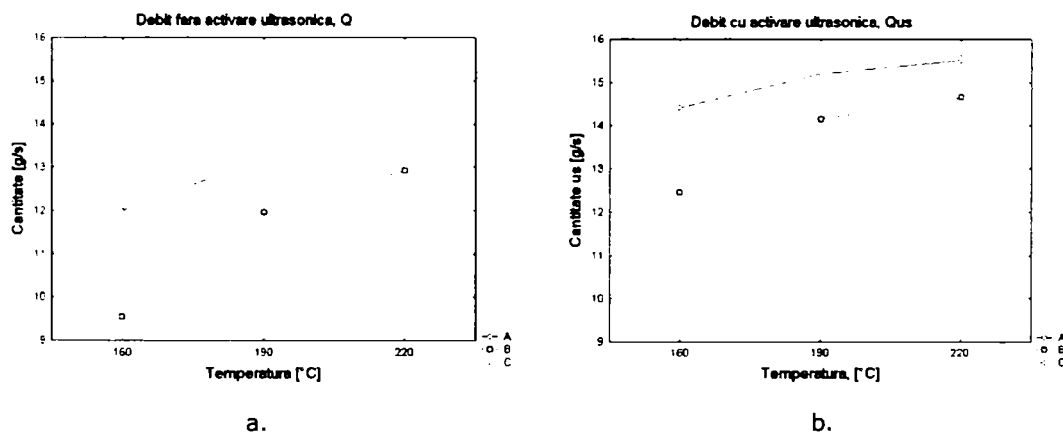
Aprecierea valorilor din tabel s-a realizat folosind o scară de la 1 la 5 unde:

- 1 – calificativ foarte slab;
- 5 – calificativ foarte bun.

Calificativele date pentru debit sunt calculate pe baza mediei aritmetice a următorilor factori:

- cantitate de material extrudat;
- aspect vizual al extrudatului pe timpul curgerii (curgere laminară – 5; curgere cu defect piele de rechin 4 – 2; curgere sacadată – 1);
- gradul de degradare termică a polimerului (material polimeric nedegradat termic – 5; material polimeric degradat termic: 1 ÷ 4).

Pe baza datelor înscrise în tabelul 7.2. s-au ridicat curbele de variație ale debitului pentru situațiile cu și fără activare ultrasonică, curbele creșterii relative de debit și curbele de calitate a suprafeței probelor obținute în procesul de extrudare.



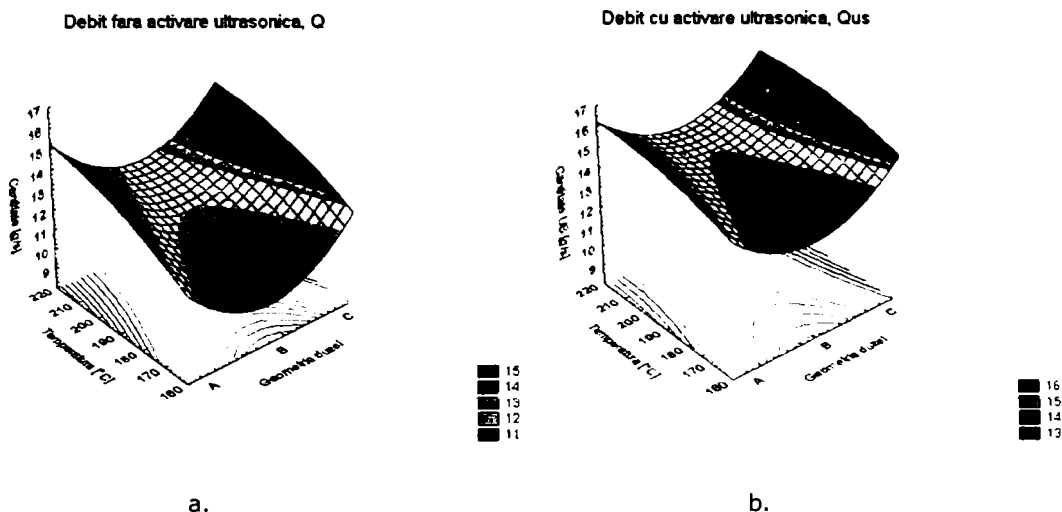
**Figura 7.5.** Curbele de variație a cantității de material extrudat funcție de temperatură pentru duzele de tip A, B și C: **a** – cantitate de material extrudată fără activare ultrasonică; **b** – cantitate de material extrudat cu activare ultrasonică

Urmărind curbele de variație ale cantității de material extrudat pentru cazul fără activare ultrasonică se constată că cele mai mici valori se obțin pentru geometria duzei de tip B, indiferent de temperatura de lucru. Se observă că în toate cele trei cazuri pe măsură ce temperatura de lucru crește, crește și debitul (figura 7.5.a).

În situația în care se trece la activarea cu ultrasunete, cele mai mici valori ale debitului se obțin tot pentru duza de tip B, iar valorile cele mai mari se obțin la folosirea duzei de tip C (figura 7.5.b). Se înregistrează o creștere a debitului odată cu creșterea temperaturii, iar valorile obținute, în ansamblu, sunt superioare celor pentru care nu s-a realizat activare cu ultrasunete.

În situația în care se presupune o evoluție continuă a geometriei duzei de la configurația A spre B și dinspre B spre C se poate imagina o reprezentare a suprafeței de răspuns a cantității de material în g/s în funcție de temperatură și

geometria duzei pentru cazul fără activare cu ultrasunete (figura 7.6.a), respectiv cu activare ultrasonică (figura 7.6.b).

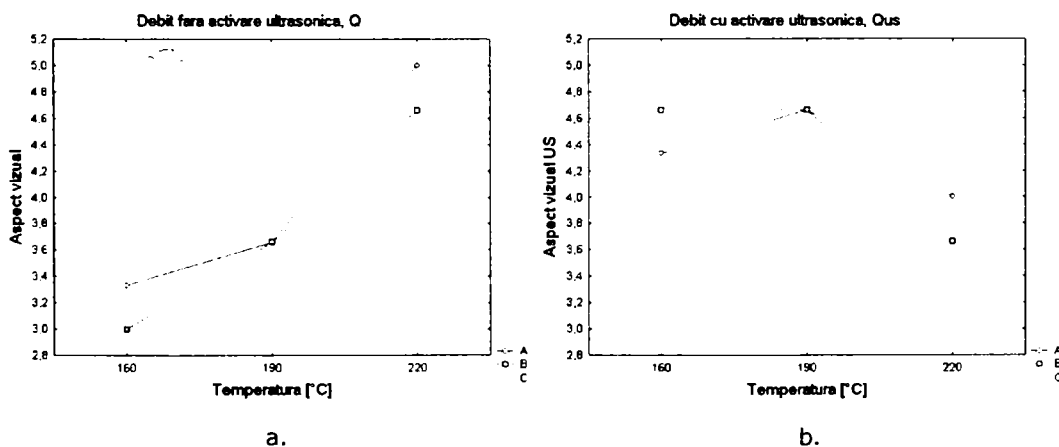


**Figura 7.6.** Suprafețele de răspuns a curbelor de variație ale cantității de material extrudat funcție de temperatură pentru duzele de tip A, B și C: pentru cazul fără activare ultrasonică (a) și cu activare ultrasonică (b)

Se constată tendințele remarcate prin analiza graficelor din figura 7.5.a și 7.5.b, iar prin această reprezentare se obține o imagine de ansamblu asupra evoluției cantității de material funcție de cele două variabile globale analizate.

Performanțele obținute pentru fiecare dintre cele trei geometrii nu sunt neapărat limitate. Reprezentarea suprafețelor de răspuns a fost realizată în ipoteza unei evoluții continue a funcției obiectiv, cantitate de material în raport cu geometria duzei și cu temperatura de lucru și presupunând această evoluție parabolică.

Eventualele modificări realizate în continuare asupra geometriei duzelor pot conduce la ameliorări ale performanțelor.



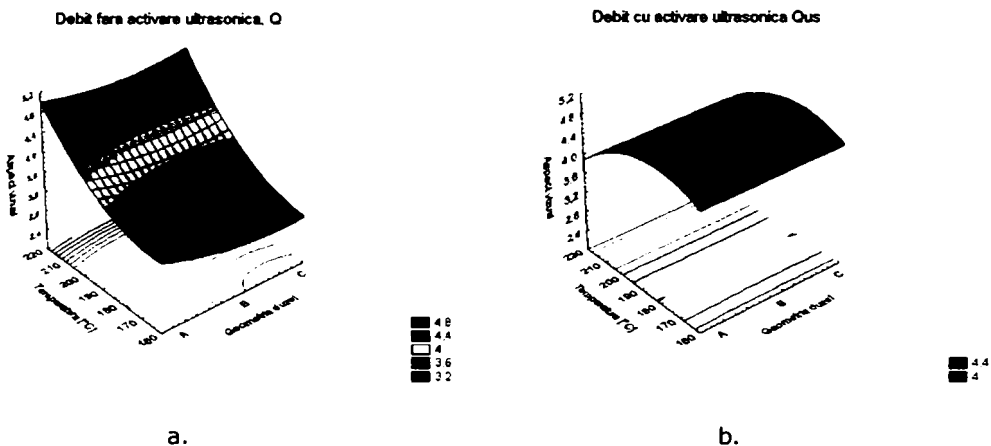
**Figura 7.7.** Curbele de variație privind calitatea suprafeței materialului HDPE după extrudare: a – fără activare ultrasonică; b – cu activare ultrasonică.

În figurile 7.7.a și 7.7.b sunt reprezentate curbele de variație a aspectului vizual al extrudatului de HDPE pentru un debit fără activare ultrasonică (figura 7.7.a), respectiv debit cu activare ultrasonică (figura 7.7.b).

Pentru cazul fără activare ultrasonică se constată că cele mai bune performanțe sunt obținute atunci când se folosește geometria duzei de tip A și B pentru temperatura de 190°C, respectiv A și C pentru temperatura de 220°C.

În situația unui debit cu activare ultrasonică, performanțele duzelor de tip A și C sunt similare, însă inferioare performanțelor atinse cu duza de tip B. Cele mai bune rezultate se obțin pentru valori scăzute ale temperaturii de extrudare (160°C).

Ca și pentru funcția obiectiv – cantitate de material extrudat, și pentru aspectul vizual al extrudatului se realizează reprezentarea suprafeței de răspuns, presupunând o evoluție continuă a temperaturii, dar și a geometriei duzei dinspre A spre B și dinspre B către C și se obțin reprezentările din figurile 7.8.a (pentru debit fără activare cu ultrasunete) și 7.8.b (pentru debit cu activare ultrasonică).



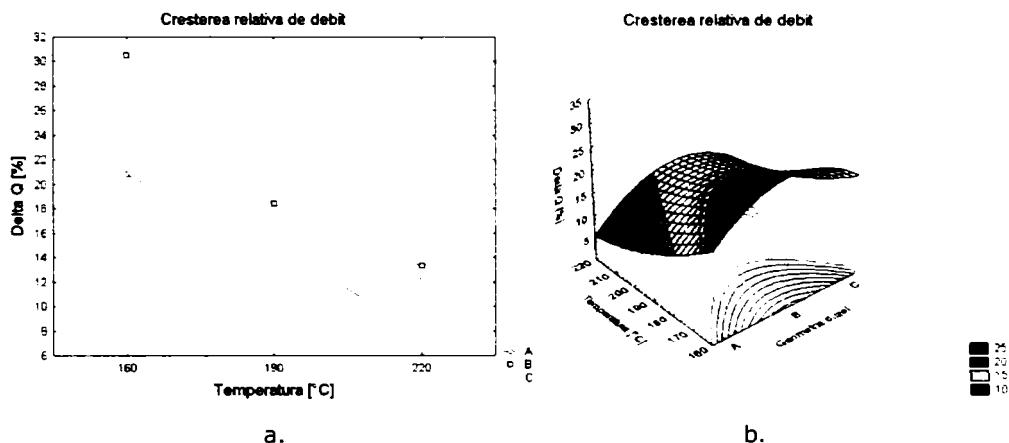
**Figura 7.8.** Suprafețele de răspuns ale curbelor de variație privind calitatea suprafeței materialului HDPE după extrudare: **a** – fără activare ultrasonică; **b** – cu activare ultrasonică.

Se observă că valori superioare ale aspectului vizual pentru cazul fără activare ultrasonică se obțin pentru duzele de tip A și C la temperaturi de 220°C, respectiv valori superioare ale aspectului vizual pentru cazul cu activare ultrasonică se obțin folosind duza de geometrie B și valori scăzute ale temperaturii de extrudare (160°C). De asemenea, se poate observa pentru cazul activării cu ultrasunete că aspectul vizual nu se modifică semnificativ cu modificarea geometriei duzei de extrudare pentru valori reduse ale temperaturii de extrudare (160°C).

În figura 7.9.a se observă variația creșterii relative de debit ( $\Delta Q$ ) funcție de temperatură pentru toate cele trei geometrii de duze utilizate. Se constată că cele mai bune performanțe sunt realizate prin folosirea duzei de tip B, în general pentru toate cele trei temperaturi, iar cele mai bune performanțe absolute sunt obținute pentru temperatura minimă.

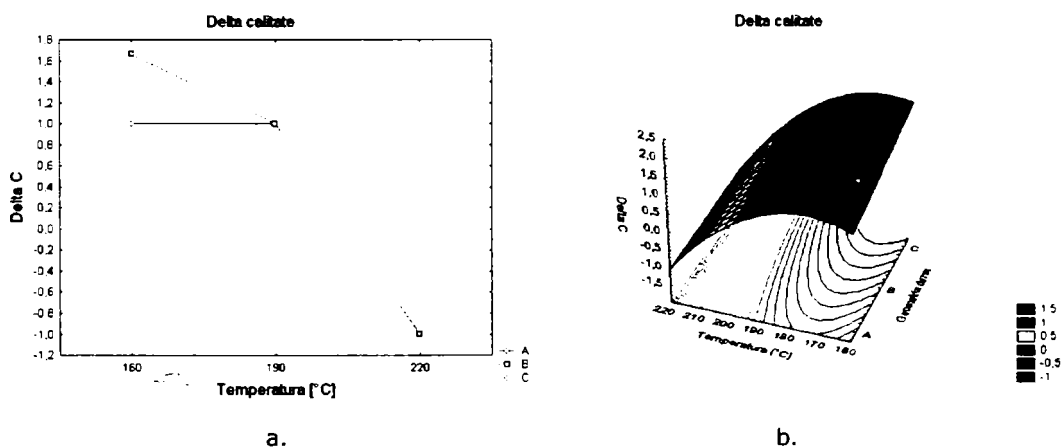
În maniera utilizată pentru reprezentările din figurile anterioare, și în figura 7.9.b este reprezentată suprafața de răspuns care oferă o imagine de ansamblu a creșterii relative de debit în spiritul celor reprezentate în figura 7.9.a. Se constată că cea mai mare mărime a creșterii relative de debit se obține pentru geometria de tip B

și pentru temperaturi de valoare redusă. În general, valori mai bune sunt obținute pentru temperaturi inferioare indiferent de tipul duzei utilizate.



**Figura 7.9.** Creșterea relativă de debit funcție de temperatură pentru duzele de tip A, B și C: **a** – curbele de variație a creșterii relative de debit; **b** – suprafețele de răspuns ale curbelor de variație a creșterii relative de debit

În figura 7.10.a este reprezentată creșterea relativă a calității ( $\Delta C$ ) în funcție de temperatură pentru fiecare din cele trei tipuri de duze utilizate.



**Figura 7.10.** Reprezentarea creșterii relative de calitate a suprafeței funcție de temperatură pentru duzele de tip A, B și C: **a** – curbele de variație a creșterii relative de calitate; **b** – suprafețele de răspuns ale curbelor de variație a creșterii relative de debit

Cele mai bune dar și cele mai spectaculoase rezultate se obțin pentru duza de tip B și C la temperaturi scăzute. Același lucru este prezentat în figura 7.10.b pentru cazul reprezentării suprafeței de răspuns funcție de temperatura de lucru și de geometria duzei.

Pentru toate cele trei duze se observă o ameliorare relativă importantă a calității la scăderea temperaturii (panta suprafeței de răspuns este mare pentru factorul de influență temperatură).

În contextul celor prezentate, cele mai bune performanțe de ansamblu sunt

obținute prin utilizarea geometriei duzei de tip B, la temperaturi scăzute, în perspectivă existând posibilitatea de principiu a ameliorării performanțelor prin ameliorarea geometriei duzei și/sau o eventuală scădere a temperaturii.

### 7.3. Metode experimentale de investigare a cercetării

#### 7.3.1. Determinări experimentale cu ajutorul Melt Flow Index (MFI)

Pentru a determina cantitatea de material de HDPE (polietilenă de înaltă densitate) ce străbate o duză de 2mm în unitatea de timp se folosește varianta ISO 1872-1, code D (a se vedea datele din tabelul 5.1., capitolul V). În urma experimentărilor se obțin rezultatele de analiză reometrică comparativă.

**Tabelul 7.3.** Rezultate experimentale conform ISO 1872-1 pentru materialul HDPE

Nr. crt.	Tip experiment	Media valorii melt index pentru materialul neactivat ultrasonic [g]	Media valorii melt index pentru materialul activat ultrasonic [g]	Timpul [s]
1	Granule HDPE virgine	0,49	-	60
2	Experiment de tip A - 160°C	0,48	0,49	
3	Experiment de tip B - 160°C	0,45	0,47	
4	Experiment de tip C - 160°C	0,50	0,50	

Rezultatele experimentale obținute în urma analizei reometrice comparative MFI sunt prezentate în tabelul 7.3. Valorile apropiate ale mediilor măsurătorilor cu melt index pentru materialul cu și fără activare cu ultrasunete ne conduc la concluzia că structura moleculară internă a polimerului HDPE nu este afectată ca urmare a activării ultrasonice.

#### 7.3.2. Determinări experimentale cu ajutorul calorimetrului diferențial (DSC)

În vederea determinării eventualelor modificări la nivelul structurii interne a materialului polimeric s-a folosit calorimetrul diferențial DSC 204 Pheonix de la firma NETZSCH.

Probele de HDPE au fost supuse unor cicluri succesive de încălzire-răcire-menținere întrucât în urma curgerii forțate a materialului polimeric printr-un orificiu de curgere (cazul extrudării) sau datorită orientărilor în cavitatea unei matrițe de injectare, în material rămân tensiuni interne reziduale de orientare a macromoleculilor care pot influența temperaturile de tranziție a polimerului, în cazul nostru a temperaturii de topire.

Rezultatele experimentale ale analizelor folosind calorimetrul diferențial, pentru cazul cu și fără activare cu ultrasunete a topiturii de material polimeric, sunt prezentate în anexa 10. Sunt prezentate etapele necesare detensionării materialului (segmentele de curbă 1 și 3), respectiv curba de caracterizare a



materialului în urma experimentărilor (segmentul de curbă 5). Etapele de experimentare sunt prezentate în continuare:

- încălzire de la temperatura ambiantă de 20°C până la 180 °C cu 20k/min (curba 1);
- menținerea 5 minute la temperatura izotermă de 180 °C;
- răcire de la temperatura de 180 °C până la -130 °C (curba 3);
- menținerea 5 minute la temperatura izotermă de -130°C;
- încălzire de la temperatura -130 până la 180 °C cu 20k/min (curba 5).

Necesitatea acestor cicluri repetate de încălzire-răcire se observă clar din faptul că temperatura de topire în primul ciclu (curba 3) are o valoare, iar la a doua încălzire (curba 5) temperatura de topire are o altă valoare.

În figurile din anexa 10 se marchează cu  $T_{TF}$  punctul de pe curba 5 care corespunde temperaturii de topire la care se obține viteza maximă de trecere a materialului polimeric de la semicristalin la amorf.

## 7.4. Concluzii

În urma cercetărilor experimentale ce au vizat activarea cu ultrasunete a curgerii materialului polimeric HDPE prin duze de diferite secțiuni (experiment de tip A, experiment de tip B, respectiv experiment de tip C) și valori ale temperaturilor de încercare de 160, 190 și 220°C s-au putut trage următoarele concluzii:

- pentru experimentul de tip A și B s-au observat următoarele efecte:
  - pentru situația *fără activare cu ultrasunete* și valori ale temperaturii de procesare de 160°C și 190°C s-a observat apariția *defectului piele de rechin*, respectiv o curgere laminară, fără defecte, pentru cazul extrudării la temperatura de 220°C;
  - pentru situația *cu activare ultrasonică* s-a observat o reducere a expansiunii extrudatului la ieșirea din duză ca efect al ultrasunetelor, respectiv pentru experimentările realizate la 160 și 190°C, curgerea este una laminară, iar defectul de tip piele de rechin este eliminat. La temperatura de 220°C s-a observat o ușoară modificare de culoare a extrudatului, modificare pusă pe seama degradării termice ca urmare a aportului termic suplimentar manifestat la nivelul zonei de contact dintre sonotrodă și topitura de material polimeric;
  - cea mai mare creștere relativă de debit, pentru experimentul de tip A a fost  $\Delta Q_{160^\circ C} = 20,75\%$ , iar pentru experimentul de tip B  $\Delta Q_{160^\circ C} = 30,5\%$ , valori obținute la o temperatură de 160°C, creștere de debit pusă pe seama manifestării efectului pelicular, de alunecare, manifestat la activarea cu ultrasunete a curgerii topiturii polimerice și de accelerare a fluidului în zona de vârf a sonotrodei.
- pentru experimentul de tip C s-au observat următoarele efecte:
  - pentru situația *fără activare cu ultrasunete* și valori ale temperaturii de procesare de 160°C, curgerea a fost sacadată și cu defecte de tip piele de rechin mai pronunțate, la 190°C defectul *piele de rechin* a fost de intensitate mai redusă, respectiv o curgere laminară, fără defecte, pentru cazul extrudării la temperatura de 220°C;
  - pentru situația *cu activare ultrasonică* s-a observat o reducere a expansiunii extrudatului la ieșirea din duză ca efect al ultrasunetelor, respectiv pentru experimentările realizate la 160 și 190°C, curgerea este una laminară, iar defectul de tip piele de rechin este eliminat. La

temperatura de 220°C s-a observat o ușoară modificare de culoare a extrudatului, modificare pusă pe seama unei eventuale degradări termice ca urmare a aportului termic suplimentar manifestat la nivelul zonei de contact dintre sonotrodă și topitura de material polimeric;

- cea mai mare creștere relativă de debit, pentru experimentul de tip C a fost  $\Delta Q_{160^{\circ}\text{C}} = 23,64\%$ , valoare înregistrată la o temperatură de 160°C, creștere de debit pusă pe seama manifestării efectului pelicular, de alunecare, manifestat la activarea cu ultrasunete a curgerii topiturii polimerice și de accelerare a fluidului în zona de vârf a sonotrodei.

Prezența vibrațiilor ultrasonice la valori ale temperaturilor de 160 și 190°C a condus la ameliorarea calității suprafeței extrudatului manifestată în timpul procesării materialelor polimerice.

Este de Menționat că la activarea cu ultrasunete a topiturii de polimer folosind un generator de ultrasunete de puterea 50W și s-a observat că efectul ultrasunetelor a fost în totalitate inhibat la trecerea polimerului prin interstițiul de curgere.

Din cercetările experimentale realizate s-a observat că cea mai mare creștere relativă de debit  $\Delta Q_{160^{\circ}\text{C}} = 30,5\%$  s-a obținut pentru cazul experimentului de tip B și o temperatură de 160°C, în condițiile unei curgerii laminare, fără defecte, respectiv cea mai însemnată pondere a ultrasunetelor în eliminarea defectelor s-a obținut pentru experimentul de tip C și temperaturi de 160, respectiv 190°C.

De asemenea, valorile apropiate ale mediei măsurărilor rezultate în urma analizei reometrice comparative MFI cu melt index pentru materialul HDPE pentru situațiile cu și fără activare cu ultrasunete ne conduc la concluzia că stuctura moleculară internă a polimerului nu a fost afectată ca urmare a activării ultrasonice. Aceste rezultate au fost confirmate și de analiza cu calorimetrul diferențial (DSC).

# CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE

## 8.1. Concluzii generale

Activarea ultrasonică a proceselor de curgere a materialelor polimerice reprezintă o alternativă tehnologică atractivă pentru aplicații cum sunt injectarea sau extrudarea. Creșterea de productivitate și ameliorarea calității produselor a fost indubitabil dovedită atât de cercetările anterior derulate pe plan mondial [ULT 03], [CHE 02, 06], [CAO 02], [Li 06], [BRE 01], [BRE 02], [BRE 03] etc. și pe plan național [STA 03, 06, 07, 08], [ICL 01, 03, 05, 08] și au fost confirmate de rezultatele obținute prin cercetările din prezenta teză.

Problema principală care personalizează prezenta cercetare în raport cu cele anterior realizate o constituie adaptarea unor proceduri și a unui sistem experimental constituit din echipamente de tip industrial folosite uzual pentru aplicații ce nu prevăd activarea cu ultrasunete. În aceste condiții s-au demonstrat creșteri relative ale debitului de curgere cuprinse în medie între 10 și 30%, asociate cu ameliorări evidente ale calității produselor fără consumuri suplimentare considerabile de energie ceea ce face ca, pentru aplicații de injectare și extrudare, caracterizate ca procedee de serie mare și cadență ridicată de fabricație, raportul final între efectele obținute și cheltuielile efectuate să fie unul favorabil.

## 8.2. Contribuții personale

În raport cu obiectivele inițial formulate și cu rezultatele final obținute în prezenta teză de doctorat se pot evidenția următoarele contribuții personale:

- Realizarea unui studiu de sinteză, adaptat cerințelor tezei, privind comportarea și proprietățile reologice ale materialelor polimerice;
- Realizarea unui studiu de sinteză și analiză privind proprietățile undelor ultrasonice, particularitățile echipamentelor ultrasonice, concepția și adaptarea acestora pentru aplicația de activare a proceselor de curgere a materialelor polimerice;
- Concepția și realizarea ansamblului ultrasonic (transductor – booster – concentrator adaptor de undă) pentru activarea ultrasonică a curgerii materialelor termoplastice la frecvența de rezonanță de 40kHz;
- Adaptarea constructivă și funcțională a generatorului de ultrasunete realizat la ISIM-Timișoara, în cadrul colectivului din care fac parte încă din 2005, necesar pentru activarea ultrasonică a curgerii materialelor termoplastice la frecvența de rezonanță de 40kHz;
- Concepția și realizarea unui dispozitiv de curgere și instalare al ansamblului ultrasonic ca element constructiv și funcțional, suport pentru

- efectuarea încercărilor experimentale folosind echipamente de tip industrial;
- Realizarea și utilizarea unui stand experimental performant constituit dintr-un generator de ultrasunete adaptat (GAMPUS-01), ansamblu ultrasonic de 40kHz, dispozitiv de curgere și instalare, mașină de injectat (tip ENGEL ESMA-Sch-10/20), aparatură de măsură și control a parametrilor de proces;
  - Realizarea unor seturi de încercări experimentale pentru materialul HDPE în condiții diferențiate, dar specifice unor aplicații de injectare sau extrudare;
  - Utilizarea pe parcursul cercetărilor a unor echipamente standard, de utilizare industrială și a unor aparate de investigație adecvate (analizor de frecvență, impedanță, generator de semnal, osciloscop, amplifmetru, senzori de temperatură, generator de aer cald, cameră video de mare viteză, analizor MFI, DSC etc.) și softuri dedicate de proiectare a boosterului și concentratoarelor adaptoare de undă, ceea ce face relevand ansamblul rezultatelor obținute și interpretarea acestora.

### **8.3. Direcții ulterioare de cercetare**

Studiile și cercetările efectuate în prezenta teză de doctorat au evidențiat următoarele direcții ulterioare de cercetare:

- Extinderea încercărilor experimentale pe actuala infrastructură pentru mai multe tipuri de materiale de interes în aplicațiile relative la injectare și extrudare;
- Studiul efectelor asupra procesului de curgere și a calității produselor obținute pentru densități de curgere ultrasonică diferite și definirea unor praguri critice.

# BIBLIOGRAFIE

- [ABD 97] Abd El-Malak, N.A – *Ultrasonic properties of composites (polymer-fiber-glass)*, Bulletin of Material Science, vol. 20, Issue 7, pg. 981-990 1997
- [ACH 02] Achilleos, E.C., Georgiou, G and Hatzikiriakos, S.G., – *Role of Processing Aids in the Extrusion of Molten Polymers*, Journal of Vinyl&Additive Technology, vol. 1 2002
- [AJJ 98] Ajji, A., Legros, N., and Dumoulin, M. – *High performance materials from oriented plastics*, Advanced Performance Materials 5, pg. 117-136 1998
- [AMZ 06] Amza, G. – *Ultrasunetele. Aplicații active*, Ed. AGIR, București 2006
- [AMZ 88] Amza, G. și colab. – *Sisteme ultraacustice*, Ed. Tehnica, București 1988
- [AMZ 02] Amza, G. și colab. – *Tratat de tehnologia materialelor*, Ed. Academiei Române, București 2002
- [AMZ 04] Amza, G., s.a. – *Tratat de Tehnologii Neconventionale*, vol. VIII, Prelucrarea prin Eroziune Ultrasonice, Ed. Bren, Bucuresti 2004
- [BĂD 67] Bădarău, E., Grumăzescu, M. – *Ultraacustică Fizică și Tehnică*, Ed. Tehnică, București 1967
- [BUL 07] Bulychev, N., at all – *Sound dispersions*, European Coatings Journal, Issue 3, pg. 32+34-37 2007
- [BRE 01] Brevet JP 2001062878 2001
- [BRE 02] Brevet JP 2000271971 2000
- [BRE 03] Brevet JP 2001001370 2001
- [BRE 04] Brevet US 2004/0195728 A1 2004
- [BU] 06] Buțu, L., – *Teză doctorat, Contribuții teoretice și experimentale privind curățirea cu ultrasunete a echipamentelor de mare precizie*, București 2006
- [CAL 07] Callister, W., D., Jr., – *Materials Science and Engineering*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York 2007
- [CAL 01] Callister, W., D., Jr., – *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York 2001
- [CAO 02] Cao, Y., Li, H. - *Influence of ultrasound on the processing and structure of polypropylene during* 2002

- extrusion*, Polymer Engineering and Science, vol. 42, Issue 7, pg.1534-1540
- [CEE 06] Contract CEE 265/2006, *Centrul virtual pentru tehnologii integrate cu aplicatii ale energiei electroultra-acustice in ingineria materialelor avansate*, ULTRATECH 2006
- [CNCSIS 13] Contract de cercetare nr. 182/2007, cod CNCSIS 13, *"Cercetari teoretice si experimentale privind activarea cu ultrasunete a proceselor de curgere a materialelor polimerice"* Director Nicușor Alin SÎRBU 2007
- [CHE 1] Chen, G., Guo, S., Li, H. - *Ultrasonic improvement of rheological behavior of polystyrene*, Journal of Applied Polymer Science, vol 84, Issue 13, pg. 2451-2460 2002
- [CHE 2] Chen, G., Guo, S., Li, H. - *Ultrasonic improvement of compatibility and rheological behavior of high-density polyethylene/polystyrene blends*, Journal of Polymer Science, vol. 86, Issue 1, pg. 23-32 2002
- [CHE 3] Chen, G., Guo, S., Li, H. - *Ultrasonic improvement of rheological behavior of polystyrene*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 86, Issue 1, pg. 23-32, October 2002
- [CHE 92] Chen, Y., Kalyon, D. M. and Bayramli, E. - *Wall Slip Behavior of Linear Low Density Polyethylene in Capillary Flow: Effects of Materials of Construction and Surface Roughness*, Society of Plastics Engineers ANTEC Technical Papers, Vol. 38, 1747-1751 1992
- [CHE 06] Chen, Y., Li, H. - *Effect of ultrasound on the viscoelasticity and rheology of polystyrene extruded through a slit die*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 100, Issue 4, pg. 2907-2911 2006
- [CHE 07] Chen, Y., Li, H. - *Mechanism for effect of ultrasound on polymer melt extrusion*, Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, vol. 45, Issue 10, pg. 1226-1233 2007
- [CLE 87] Cleșiu, S.R. - *Sudarea materialelor plastice*, ISIM OID. ICM, SID 73, Editată de OID pentru TCM prin Institutul de Cercetare Științifică și Tehnologică și Inginerie Tehnologică pentru Industria Construcțiilor de Mașini 1987
- [CLE 89] Cleșiu, S.R. - *Stadiul și tendințele de dezvoltare a sudării cu ultrasunete a materialelor plastice și metalice*, OID. ICM, SID 80, București 1989
- [DEL 98] DeLaney, D. E., Reilly, J. E. - *A new approach to polymer rheology for process and quality control*, Plastics Engineering 1998

- [FLO 85] Florescu, M. - *Competiția dintre materialele macromoleculare naturale și sintetice*, Ed. Tehnică, București 1985
- [GRU 61] Grumăzescu, M., - *Simfonia ultrasunetelor*, Ed. Tineretului 1961
- [GUO 03] Guo, S., Li, Y., Chen, G., Li, H. - *Ultrasonic improvement of rheological and process behavior of LLDPE during extrusion*, J. Polymer International, nr. 52 (1), pg. 68-73 2003
- [IBA 04] Ibar, J.P. - *Control of polymer properties by melt vibration technology: A review*, Polymer Engineering and Science, vol. 38, Issue 1, pg. 1-20 2004
- [ICL 01] Iclănzan, T., Stan, D., Abadie, M. - *A possible new ultrasonic thermo-pellicular effect and applications*, ESAFORM 2008 Conference on Material Forming, Lyon, France 2008
- [ICL 02] Iclănzan, T., Stan, D. - *Ultrasonic activation limits in thermoplastics injection and extrusion*, Rev. Materiale plastice 2005
- [ICL 03] Iclănzan, T., Stan, D. - *Limits in the ultrasonic activation of polymeric materials in injection and extrusion processes*, Materiale plastice, vol. 42, Issue 2, pg. 93-99 2005
- [ICL 04] Iclănzan, T. - *Plasturgie - Tehnologia prelucrării materialelor plastice*, Ed. Politehnica, Timișoara 2003
- [ICL 05] Iclănzan, T. A., Stan D.V. - *Procedeu și cap de extrudare cu activare ultrasonică - Brevet de invenție nr. 118576B BOPI* 7/2003
- [ICL 06] Iclănzan, T.A., Stan D.V. - *Matriță de injectare cu canale calde, activată ultrasonic - Brevet de invenție nr. 118400B BOPI* 5/2003
- [ICL 07] Iclănzan, T., - *Teza de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara* 1976
- [JAK 88] Jaksch, E., Chetaru, D., Manea, G. - *Materiale plastice poliamidice*, Ed. Tehnică, București 1988
- [JIA 05] Jiang, L.I., Liang, M., Guo, S., Kuthanová, V., Hausnerová, B. - *Linear viscoelastic properties of high-density polyethylene/polyamide-6 blends extruded in the presence of ultrasonic oscillations*, Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, vol. 43, Issue 10, pg. 1260-1269 2005
- [KAL 1] Kalyon, D. M., Birinci, E. and Gevgilili, H. - *Development of Extrusion Instabilities and Surface Irregularities of Extrudates of Polymer Melts and Filled*

- Polymers, Highly Filled Materials Institute*
- [KIS 94] Kissi, N. E. and J. M. Piau, - *Adhesion of linear low density polyethylene for flow regimes with shark skin*, J. Rheol. 38, 1447-1463 1994
- [KIS 97] Kissi, E. N., J. M. Piau and F. Tussaint, - *Sharkskin and cracking of polymer extrudates*, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 68, 271-290 1997
- [LIJ 04] Li, J., Liang, M., Guo, S., Lin, Y. - *Studies of chain scission and extension of polyamide 6 melt in the presence of ultrasonic irradiation*, Polymer Degradation and Stability, vol. 86, Issue 2, pg. 323-329 2004
- [LIJ 06] Li, J., Guo, S., Liang, M. - *Effect of ultrasonic oscillation on processing behaviors of PS, EPDM, and PS/EPDM blend*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 100, Issue 3, pg. 1856-1863 2006
- [LIY 05] Li, Y., Li, J., Guo, S., Li, H. - *Mechanochemical degradation kinetics of high-density polyethylene melt and its mechanism in the presence of ultrasonic irradiation*, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 12, Issue 3. Pg. 183-189 2005
- [LUC 07] Luchian. C., AMZA. G., DUMITRACHE. F. - *Theoretical and experimental contributions concerning the projection of shaped ultrasound energetic concentrator profiled type used for the ultrasound welding of mixed materials*, SISOM 2007 and Homagial Session of the Commission of Acoustics, Bucharest, 29-31 May 2007
- [MAR 86] Marinescu. N.I. - *Prelucrări cu ultrasunete. Utilizări în industria constructoare de mașini*, Ed. Tehnică, București 1986
- [MIH 89] Mihail. R., Ștefan. Al., - *Simularea proceselor de prelucrare a polimerilor*, Editura Tehnică, București 1989
- [MIL 04] Miller, E. - *Control of the sharkskin instability in the extrusion of polymer melts using induced temperature gradients*, ReoFuture Conference, Karlsruhe/Germany 2004
- [MIL 06] Miller, E., Lee, S. J. and Rothstein, J. P. - *The effect of temperature gradients on the sharkskin surface instability in polymer extrusion through a slit die*, Journal Rheological Acta (Springerlink), vol. 45, nr. 6, pg. 943-950 2006
- [NAG 05] Nagasaka, M., Mitsumata, T., Takimoto, J.-I. - *Ultrasonic properties for polymer gels by ultrasonic pulse-echo method*, Polymer Preprints, Japan, vol. 54, Issue 2, pg. 3670 2005
- [NUJ 83] Nuță, M., Nuță, D. - *Ambalaje din material plastic*, Ed. 1983



- Tehnică, București
- [OAN 07] Oancă, O., **Sîrbu, N.A.** – *Procedeu hibrid de îmbinare a materialelor electric prin presiune și cu ultrasunete*, International Conference Innovative Technologies For Joining Advanced Materials, ISIM, Timișoara 2007
- [OAN 08] Oancă, O., **Sîrbu, N.A.** – *Aspects concerning ultra-acoustic energy utilization in joining techniques of polymeric materials in automotive industry*, International Conference Innovative Technologies For Joining Advanced Materials, ISIM, Timișoara 2008
- [OAN 09] Oancă, O., **Sîrbu, N.A.** – *Echipamente și tehnologii de activare cu ultrasunete a materialelor inginerești*, Workshop – Aplicații ale energiei electroultraacustice în ingineria materialelor avansate, 16 septembrie, ISIM, Timișoara 2008
- [OHJ 03] Oh, J.S., Isayev, A.I., Rogunova, M.A. – *Continuous ultrasonic process for in situ compatibilization of polypropylene/natural rubber blends*, J. Polymer, nr 44 (8), pg. 2337-2349 2003
- [OLI 07] Olive, G. – *Chimie des Polymères*, Ecole Industrielle et Commerciale de la Ville de Namur 2007
- [OLI 08] Olive, G. – *Chimie des Matériaux*, Ecole Industrielle et Commerciale de la Ville de Namur 2008
- [PEN 07] Peng, B., Guo, S. – *Effect of ultrasonic degradation of properties of propylene based plastomer*, Hecheng Shuzhi Ji Suliao/China Synthetic Resin and Plastics, vol. 24, Issue 2, pg. 45-48 2007
- [PRI 96] Price, G.J., West, P.J. – *Ultrasonic production of block copolymers as in situ compatibilizers for polymer mixture*, Polymer, vol. 37, nr. 17, pg. 3975-3978 1996
- [PUT 07] Putz, V., **Sîrbu N. A.**, Dume A. – *Contributions regarding the utilization of the catastrophe surface concept for study of the worm-thread milling cutters wear in conditions of cylindrical gear wheels fabrication*, ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering, Vol. VI (XVI) 2007
- [QIN 06] Qin, X., Qu, J., Cao, X. – *Structure and properties of vibrating extruded high-density polyethylene sheet*, Journal Polymer Bulletin, vol. 56, nr. 6, pg. 607-618 2006
- [SAH 96] Sahnoune, A., Massines, F., Piché, L. – *Ultrasonic measurement of relaxation behavior in polystyrene*, Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, vol. 34, Issue 2, pg. 341-348 1996

- [SÎR 08] **Sîrbu, N.A.**, Iclănzan, T., Oancă, O. – *Conception, design and realization of the ultrasonic assembly for flow activation devices of the polymeric media*, Symposium of the Institute of Solid Mechanics, SISOM 2008 & Symposium of Acoustics, București 2008
- [SÎR 09] **Sîrbu, N.A.**, Iclănzan, T., Oancă, O. – *Construction particularities of the ultrasonic equipments for flow activation of polymeric media, in the extrusion-injection processes*, Rev. BID, nr. 4/2008 2008
- [STA 01] Stan D., T Iclanzan – *Algorithme de control de la qualite de produits injectes*, Rev. Academic Journal of Manufacturing Engineering - AJME, vol. 1, nr. 4, pg. 51 2003
- [STA 02] Stan D., Tulcan, A., Turc, C. – *The modification of the crystallinity rate of the polymers injected / extruded under ultrasonic activation*, Conferinta Internaționalăa TMCR 2003, Edit. UTM Chisinau, vol. II, pg. 502, Chisinău 2003
- [STA 03] Stan, D. – *Aplicații ale ultrasunetelor în procesarea materialelor polimerice*, Ed. Politehnica, Timișoara 2003
- [STA 04] Stan D., Tulcan, A., s.a. – *Considerations theoriques concernant les proprietes rheologiques des polymeres fondus*, B. Șt. al UPT, Tom 47(61), Fascicola 1, pg. 45 2002
- [STA 05] Stan D., Turc, C., Tulcan, A. – *Evaluation de l'activation par ultrasons comme facteur d'influence sur les proprietes d'ecoulement des fondus polymere sous pression*, B. Șt. al UPT, Tom 47(61), Fascicola 1, pg.55 2002
- [STA 06] Stan, D., Iclănzan, T., Abadie, M. – *Applications de l'effet thermo-pelliculaire de surface* B. Șt. UP Timișoara, Seria Chimie si Ingineria Mediului, Tom 46(60), pg. 240 2001
- [STA 07] Stan, D., Iclănzan, T., Abadie, M. – *L'effet de surface dans le cas de l'activation ultrasonique des milieux visqueux sous pression*, Synthetic Polymer Journal, vol. VII, pg. 84-91 2000
- [STA 08] Stan, D., Iclănzan, T., Abadie, M. – *Influence des ultrasons sur la vitesse d'ecoulement lors de l'injection de thermoplastiques*, Journee de l'ecole doctorale "Matiere Condensee", Univ. Montpellier 2 /France, vol. 4, pg. 40 1997
- [STA 09] Stan, D., Iclănzan, T. – *Activarea ultrasonică a curgerii materialului polimeric plastifiat în procesul de punere în formă*, Academia Română, Comisia de Acustică, Sesiune de comunicări, caiet 25, pag. 121, București 1995





- [ȘER 02] Șereș, I. – Materiale termoplastice pentru injectare, tehnologie, încercări, Ed. Imprimeria de Vest, Oradea 2002
- [ȘER 99] Șereș, I – Matrițe de injectat, Ed. Imprimeriei de vest, Oradea 1999
- [VLA 03] Vlachopoulos, J. and Strutt, D. – "Overview: Polymer Processing", Mat. Sci. Tech., 19, 1153-1160 2003
- [VOL 02] Voloșenco, C. – Implementarea în industrie a ultrasunetelor de putere, Ed. Matrix Rom, București 2002
- [WAN 01] Wang, Q., Xia, H., Zhang, C. – Preparation of polymer/inorganic nanoparticles composites through ultrasonic irradiation, Journal of Applied Polymer Science, vol. 80, pg. 1478-1488 2001
- [WAN 99] Wang, Shi-Quing – Molecular Transitions and Dynamics at Polymer / Wall Interfaces: Origins of Flow Instabilities and Wall Slip, Ed. Springer Berlin / Heidelberg 1999
- [WAN 96] Wang, S.Q., Drada, A.P. and Inn, Y.W. – Exploring molecular origins of sharkskin, partial slip and slope change in flow curves of linear low density polyethylene, J. Rheol. 1996
- [WUH 05] Wu, H., Guo, S., Li, Z. – Effect of ultrasonic oscillations on linear viscoelastic behaviours of metallocene-catalyzed linear low density polyethylene and its blends with low density polyethylene, Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, vol. 43, issue 21, pg. 3030-3043 2005
- [STP 97] \*\*\*Firma STAPLA – Ultrasonic metal welding. Principles and application of high-grade bonding technology, Germany 1997
- [PLA 83] \*\*\*Revista de plasticos Modernos, nr. 328, pg. 393 1983
- [KUN 61] \*\*\*Kunststoffe R.F.G., 59, Oct. nr.10, pg. 601 1961
- [NOU 97] \*\*\*Nouvelles de selection et mise in oeuvre de plastiques pour l'elaboration des produits industriels, Editions Weka 1997
- [ACC 01] \*\*\*www.accusonics.com
- [BRA 01] \*\*\*www.branson-plasticsjoin.com
- [BRA 02] \*\*\*www.branson.com
- [BRI 01] \*\*\*http://www.britannica.com
- [CHE 01] \*\*\*www.chemsoc.org
- [CIS 01] \*\*\*www.cisimpex.ro

- [CON 01] \*\*\*<http://www.condale.co.uk>
- [ENG 01] \*\*\*[www.engelglobal.com](http://www.engelglobal.com)
- [JOB 01] \*\*\*<http://www.jobwerx.com>
- [KRE 01] \*\*\*[www.krell-engineering.com](http://www.krell-engineering.com)
- [MAS 01] \*\*\*<http://www.mastersonics.com>
- [MPI 01] \*\*\*[www.mpi-ultrasonics.com](http://www.mpi-ultrasonics.com)
- [MRL 01] \*\*\*[www.Mrl.ucsb.edu](http://www.Mrl.ucsb.edu)
- [NDT 01] \*\*\*<http://www.ndt-ed.org>
- [PIC 01] \*\*\*[www.piceramic.com](http://www.piceramic.com)
- [PLA 01] \*\*\*[www.plastics.dupont.com](http://www.plastics.dupont.com)
- [POW 01] \*\*\*[www.powerultrasonics.com](http://www.powerultrasonics.com)
- [PTO 01] \*\*\*[www.ptonline.com](http://www.ptonline.com)
- [REC 01] \*\*\*[www.reciclare-deseuri.ro](http://www.reciclare-deseuri.ro)
- [REC 02] \*\*\*[www.reciclabileromania.ro](http://www.reciclabileromania.ro)
- [SCO 01] \*\*\*[www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- [TAN 01] \*\*\*<http://www.tangram.co.uk>
- [TXR 01] \*\*\*<http://www.txre.net>
- [ULR 01] \*\*\*[www.ultrasonics.de](http://www.ultrasonics.de)
- [ULT 01] \*\*\*<http://www.ultrasonicsworld.com>
- [ULT 03] \*\*\*<http://www.ultramelt.org>, Ultra-Melt Project.
- [USC 01] \*\*\*<http://faculty.uscupstate.edu>
- [USE 01] \*\*\*[www.usedultrasonicwelders.com](http://www.usedultrasonicwelders.com)

# ANEXE

- A1.** Istoricul materialelor polimerice;
- A2.** Studiu comparativ al tansductoarelor generatoare de ultrasunete;
- A3.** Cel mai des întrebuințate tipuri de concentratoare cu elementele de calcul necesare;
- A4.** Abrevieri ale unor materiale plastice uzuale;
- A5.** Analize pirometrice (proba de ardere);
- A6.** Forma programului de prelucrare a elementelor dispozitivului de curgere și instalare a ansamblului ultrasonic pe mașini cu comandă numerică;
- A7.** Rezultatele experimentale de activare cu ultrasunete aferente experimentului de tip A;
- A8.** Rezultatele experimentale de activare cu ultrasunete aferente experimentului de tip B;
- A9.** Rezultatele experimentale de activare cu ultrasunete aferente experimentului de tip C;
- A10.** Rezultatele experimentale ale tranziției de stare a polimerului folosind analiza DSC (Differential Scanning Calorimeter)

## Istoricul materialelor polimerice [OLI 08]

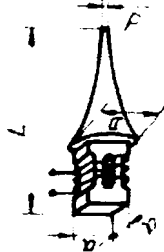

Anul prod.	Jara de origine	Numele materialului plastic	Produs prin sinteza	Modul de prezentare	Proprietăți de stare	Utilizări practice	
1859	GB	Fibră de vulcanizare	Hidroceluloză	Semifabricat	Termorigid	Valize, garnituri	
1869	USA	Celuloid	Nitrat de celuloză (nitroceluloză), camfor	Semifabricat	Termoplastic	Mingi de tenis, mese, podoabe de păr	
1904	D	Galalit	Cazeină	Semifabricat	Termorigid	Nasturi, catarama	
1909/1923	USA, D/A	Fenoplast / aminoplast (rășină sintetică)	Fenol, cresol (fenol derivat din toluen), formaldehidă, constituent parțial / uree, melanină, formaldehidă, constituent parțial	Pudră, granule	Termorigid	Piese electrotehnice, scrumiere auto	
1930	D	Polistiren	Benzen, etilenă	Granule	Termoplastic	Ambalaje, jucării	
1933	D	Sticlă acrilică (plexiglas)	Metacrilat de metil	Granule, semifabricat	Termoplastic	Catadioptrii (ochi de pisică), cupole transparente, geam duplex (incasabil), panouri luminoase pentru reclame	
1938	D	Clorură de polivinil	Etilenă, clor	Pudră, granule	Termoplastic	Discuri fonografice, cercevea (cadru de geam)	
1938	D	Poliamidă	Aminoacizi, diacid, diamină	Granule	Termoplastic	Roți dințate, șuruburi, conducte de frânare auto	

1939	GB	Polietilenă de joasă densitate	Etilenă	Granule	Termoplastic	Filme, corpuri cave, tubulare	
1940	D	Poliuretan	Izocianat, polialcool	Lichidă	Termorigid / Termoplastic / Elastomer	Articole sportive, mobilă, saltele, izolații termice, cercevele	
1941	USA	Politetrafluoretilenă	Tetrafluoretilenă	Pudră	Termoplastic	Izolații electrice	
1941	USA	Poliester nesaturat	Diacid, diol de polialcool	Lichidă în soluție de stiren	Termorigid	După întărirea fibrei de sticlă: cutii poștale, rezervoare, cabine telefonice,	
1943	USA	Silicon	Siliciu, clorură de metil	Uleiuri, rășini, paste	Termoplastic / elastomer	Forme turnate (de turnare), materiale de etanșare, cabluri, îmbinări, agenți de impregnare	
1946	CH	Rășini epoxidice	Epiclorhidrină, difenilol-propan	Rășină lichidă + întăritor	Termorigid	După întărirea fibrei de sticlă: articole de sport, industria aeronautică și navală	
1955	D	Polietilenă de înaltă densitate	Etilenă	Granule	Termoplastic	Corpuri cave (tubulare), etajere, tuburi sub presiune	
1956	D	Polycarbonat	Bifenol A	Granule	Termoplastic	Geam duplex (incasabil), panouri de semnalizare, cozoare caschete, carcase pentru aparatură de birou și aparate electrocasnice	

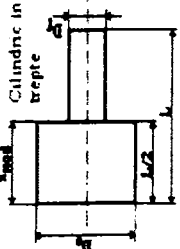
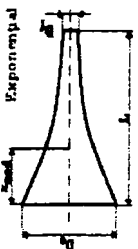
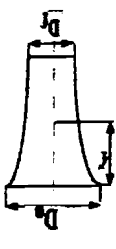
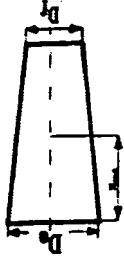
1957	D	Polipropilenă	Propilenă	Granule	Termoplastic	Corpuri cave, articole menajere și medicale	
1958	USA	Poliacetat	Formaldehidă	Granule	Termoplastic	Roți dințate, piese tehnice pentru: aparate electromenajere, telefoane, radiouri, televizoare, picup	



Studiu comparativ al transducoarelor generatoare de ultrasunete [ICL 02] [STA 03]

Caracteristici		Transductor	
		magnetostriktiv	piezoelectric
Suprafață radiantă maximă (a x a: φa), [cm <sup>2</sup> ]		Nichel (tole)  25	PZT (Zirconat-titanat de plumb) (PbTiO <sub>3</sub> ) <sub>0,35</sub> • (PbZrO <sub>3</sub> ) <sub>0,65</sub>  20
Putere specifică admisibilă [W/cm <sup>2</sup> ]		15 -50	15 -20
Putere totală în regim de lucru, fără distorsiuni, [W]		400 -2500	300 - 400
Randament electro-acustic		0,45	0,90
Dimensiuni convector [mm]	Gabarit		
Limitări tehnologice	<p>D ≈ 50 mm    ∞    pentru a evita oscilațiile transversale  d ≈ 5 -10 mm    ∞    pentru a evita suprasolicitarea și scăderea rezistenței mecanice a vârfului concentratorului</p>		
Avantaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- construcție mecanică simplă,</li> <li>- rezistență și fiabilă.</li> <li>- stabilitate în funcționare la frecvența de rezonanță</li> <li>- răcirea se poate face cu apă</li> </ul>		
Dezavantaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cost ridicat al tolelor de nichel de grosime 0,1 mm</li> </ul>		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- factor de calitate ridicat</li> <li>- costul scăzut al transducoarelor ferice</li> <li>- răcirea se poate face cu apă</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- randament acustic remarcabil</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- asamblare prin lipire cu rășini epoxidice (transductor /concentrator)</li> <li>- randament scăzut</li> <li>- putere specifică redusă</li> <li>- rezistență mecanică slabă</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cost ridicat</li> <li>- sensibilitate a transductorului (casant) la suprasolicitare mecanică</li> </ul>

**Cel mai des întrebuițate tipuri de concentratoare cu elementele de calcul necesare**  
[AMZ 06]

Nr. Crt.	Tipul concentratorului	Legea de variație a secțiunii	Coefficientul teoretic de amplificarea a amplitudinii	Lungimea concentratorului	Poziția nodului deplasării
1	 Cilindric în trepte	<p>pentru <math>0 \leq x \leq 1</math> <math>D_2 = D_1</math></p> <p>pentru <math>1 \leq x \leq 2</math> <math>D_2 = D_1</math></p>	$N = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 = N^2$	$L = \frac{c}{2f} = \frac{c}{2f}$	$X_{\text{nod}} = \frac{l}{2} = \frac{C}{4f}$
2	 Exponențial	$D_1 = D_2 \cdot e^{\frac{\alpha x}{L}}$ $\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\pi + (\ln N)^2}$ $N = \frac{D_2}{D_1}$	$N = \frac{D_2}{D_1} = N$	$L = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left( \frac{\ln N}{\pi} \right)^2}$	$X_{\text{nod}} = \frac{L}{\pi} \arctg \frac{\ln N}{\pi}$
3	 Catenoidală	$D_2 = D_1 \cdot \text{ch} \beta(L - x)$ $\beta = \frac{1}{L} \arg \text{ch} N$	$N = \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi}{x} \right)^2}$ $N < N$	$L = \frac{c}{2f} \frac{(\alpha k)}{\pi}$ $\text{tg}(\alpha k) = \frac{\alpha k}{(\alpha k)^2 N^2 + 1}$	$X_{\text{nod}} = \frac{l}{\alpha} \arctg \left( \frac{\alpha}{\alpha} \right)$ $\alpha = \frac{\omega}{c}; \alpha = \frac{\omega}{c}$
4	 Conică	$D_2 = D_1 \cdot \text{ch} \beta(L - x)$ $\beta = \frac{1}{L} \arg \text{ch} N$	$N = \frac{N}{\cos(kL)}$ $N > N$	$L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(kL)^2 + (\arg \text{ch} N)^2} \cdot (kL) +$ $= -\sqrt{1 - \frac{1}{N^2} \arg \text{ch} N}$	$X_{\text{nod}} = \frac{1}{k} \arctg \left( \frac{k}{k} \cdot \frac{(\text{ch} N)^2}{N} \right)$ $k = \sqrt{\alpha^2 \cdot N^2}$

## ABREVIERI ALE UNOR MATERIALE PLASTICE UZUALE [REC 01]

MATERIAL PLASTIC	ABREVIERI ÎN LIMBA			
	ROMÂNĂ	GERMANĂ	ENGLEZĂ	FRANCEZĂ
Acrilonitril-butadien-stiren copolimer	ABS	ABS	ABS	ABS
Acetat de celuloză	CA	CA	CA	AC
Acetobutirat de celuloză	CAB	CAB	CAB	CAB
Etil celuloză	EC	EC	EC	EC
Poliacetal (Polioximetilen)	POM	POM	POM	POM
Poliamidă PA	PA	PA	PA	
Poliariletercetonă		PAEK	PAEK	PAEK
Polietercetonă		PEK	PEK	PEK
Poliarilsulfonă	PALS			PAS
Polibutilentereftalat	PBT	PBTP	PBTP	PBTP
Policarbonat	PC	PC	PC	PC
Policlorură de vinil clorurată	PVC-C	PVCc		PVC-C
Policlorură de vinil plastifiată	PVC-M	PVCw		PVC-P
Policlorură de vinil rigidă	PVC-D	PVCh		PVC-U
Policlorură de vinilden	PVDC	PVDC	PVDC	PVDC
Policlorotrifluoretilenă	PCTFE	PCTFE	PCTFE	PCTFE
Poliетенă de joasă densitate	PEJD	LDPE	LDPE	PE-LD
Polietilenă de înaltă densitate	PEID	HDPE	HDPE	PE-HD
Polieterestercetonă		PEEK	PEEK	PEEK
Polieterestercetoncetonă		PEEKK	PEEKK	PEEKK
Polietersulfonă	PES	PES	PES	PES
Polieter clorurat	PEC			
Polietilentereftalat	PET	PETP	PET	PETP
Polifenilenoxid	PPO	PPO	PPO	PPO
Polifluorură de vinil	PVF	PVF	PVF	PVF
Polifluorură de vinilden	PVDF	PVDF	PVDF	PVDF
Polifenilensulfură	PPS	PPS	PPS	PPS
Polimer pe bază de cristale lichide	LCP	LCP	LCP	LCP
Polimetacrilat de metil	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA
Polimetilentereftalat	PMT	PMTTP		PMTTP
Polipropilenă	PP	PP	PP	PP
Polistiren de uz general	PS	PS	PS	PS
Polistiren rezistent la șoc	PAS	SB		SB
Politetrafluoretilenă	PTFE	PTFE	PTFE	PTFE
Polisulfonă PSU	PSU	PSU	PSU	
Poliuretan termoplastic	PU	PUR	PUR	PUR
Polivinil butiral	PVB	PVB	PVB	PVB
Polivinil formal	PVFM	PVF	PVF	PVF
Stiren acrilonitril copolimer	SAN	SAN	SAN	SAN

**ANALIZE PIROMETRICE (PROBA DE ARDERE) [REC 02]**

- Siliconii, Teflonul, nu ard;
- Fenoplaste și aminoplaste - lipsa flăcării, gazele degajate ard cu flacără de culoare galbenă, cu miros de formol și fenol, arderea e foarte dificilă;
- PVC - flacăra se stinge dacă îndepărtăm sursa de foc, se degajă un miros înțepător de clor, flacăra are culoarea galbenă cu marginea inferioară verde, fumul este alb, arderea este dificilă;
- Celuloidul - arde cu flacără persistentă, miros de camfor, flacără galbenă foarte luminoasă, arderea foarte ușoară fără cenușă;
- Poliuretani - ard cu flacără persistentă, miros picant, ardere ușoară, fum de culoare cenușie, ardere completă fără cenușă;
- Polietilena - arde cu flacără persistentă, miros de parafină arsă (lumânare), culoarea flăcării bleau, iar la vârf galbenă, arderea ușoară fără cenușă;
- Poliamidele - ard cu flacără persistentă, miros de iarbă arsă sau țelină proaspătă, flacără de culoare albastră, iar la vârf galbenă, ardere moderată dar completă (fără cenușă);
- Polistirenul - arde cu flacără persistentă, are culoarea galbenă orange și cu miros de flori (aromat), arde cu jeturi, ușor și degajă un fum negru dens.

**Forma programului de prelucrare a elementelor dispozitivului de curgere și  
instalare al ansamblului ultrasonic pe mașini cu comandă numerică**

Pentru operația de găurire programul de prelucrare pe mașini cu comandă numerică este de forma:

```
%
N100 G0 T11 M6
N110 G0 X-38. Y-15.
N120 S100 M3
N130 Z2.
N140 G81 X-38. Y-15. Z3. F15
N150 Y38. Z3.
N160 X38. Z3.
N170 Y-15. Z3.
N180 X0. Y18. Z3.
N190 G80
N200
N210
N220 M5
N230 G0 M25
N240 M2
E
```

Pentru operația de degroșare programul de prelucrare pe mașini cu comandă numerică este de forma:

```
%
N100 G0 T3 M6
N110 G0 X0. Y18.
N120 S3500 M3
N130 Z15.
N140 Z5.2
N150 G1 Z-.3 F300
N160 X.33 Y16.139 F1800
N170 X1.048 Y17.749
N180 X1.009 Y18.554
N190 X.272 Y19.359
N200 X-.279
N210 X-1.021 Y18.554
N220 X-1.051 Y17.749
N230 X-.537 Y16.944
N240 X.33 Y16.139
N250 X-2.979 Y7.284
N260 X2.982
.....

N8440 G3 X-9.175 Y6.827 I-8.675 J6.827
```

N8450 G3 X-8.982 Y6.432 I-8.675 J6.827  
 N8460 G3 X-7.785 Y5.59 I0.594 J18.762  
 N8470 G3 X-.002 Y3.355 I-0.002 J18.024  
 N8480 G3 X9.832 Y7.14 I-0.002 J18.024  
 N8490 G3 X13.039 Y11.324 I0.185 J17.855  
 N8500 G3 X14.652 Y18.004 I0.012 J18.004  
 N8510 G3 X6.762 Y30.996 I0.012 J18.004  
 N8520 G3 X-.002 Y32.653 I-0.002 J18.023  
 N8530 G3 X-9.046 Y29.522 I-0.002 J18.023  
 N8540 G3 X-14.649 Y18.013 I-0.027 J18.013  
 N8550 G3 X-14.647 Y17.781 I-0.027 J18.013  
 N8560 G3 X-14.301 Y14.827 I0.146 J18.017  
 N8570 G3 X-12.342 Y10.109 I0.254 J18.104  
 N8580 G3 X-10.094 Y7.383 I0.445 J18.366  
 N8590 G3 X-8.982 Y6.432 I0.594 J18.762  
 N8600 G3 X-8.582 Y6.132 I0.594 J18.762  
 N8610 G3 X-8.288 Y6.037 I-8.288 J6.537  
 N8620 G3 X-7.883 Y6.243 I-8.288 J6.537  
 N8630 G1 X-7.59 Y6.647  
 N8640 G0 Z-44.7  
 N8650 Z15.  
 N8660  
 N8670  
 N8680 M5  
 N8690 G0 M25  
 N8700 M2  
 E

Pentru operația de finisare programul de prelucrare pe mașini cu comandă numerică este de forma:

%  
 N100 G0 T4 M6  
 N110 G0 X-12.659 Y5.204  
 N120 S3500 M3  
 N130 Z15.  
 N140 Z5.  
 N150 G1 Z0. F1000  
 N160 X-12.538 Y5.086 Z-.008 F1800  
 N170 X-12.058 Y4.636 Z-.041  
 N180 X-11.453 Y4.114 Z-.081  
 N190 X-10.834 Y3.625 Z-.121  
 N200 X-10.213 Y3.179 Z-.159  
 N210 X-9.61 Y2.78 Z-.195  
 N220 X-9.247 Y2.557 Z-.216  
 N230 X-8.854 Y2.329 Z-.239  
 .....  
 N5260 X-1.748 Y18.061 Z-89.994  
 N5270 Y17.926 Z-90.  
 N5280 G3 X0. Y16.251 I0. J18.001  
 N5290 G3 X1.75 Y18.001 I0. J18.001

N5300 G1 Y18.006  
N5310 G3 X0. Y19.748 IO. J17.999  
N5320 G3 X-1.748 Y18.061 IO. J17.999  
N5330 G1 Y17.943  
N5340 G0 Z-85.  
N5350 Z15.  
N5360  
N5370  
N5380 M5  
N5390 G0 M25  
N5400 M2  
E

## REZULTATE EXPERIMENTALE - EXPERIMENT DE TIP A

Experiment de tip A 160°C, $d_c = 3,9\text{mm}$ , $h_c = 3,7\text{mm}$ .								
Nr. crt.	Interstițiul de curgere, $l$ [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, $F$ [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, $Z_r$ [ohm]	Temperatura de extrudare, $T$ [°C]	Țiimpul de experimentare, $t$ [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, $Q$ [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]	
1	1,2	38,623	142	160	15	11,9	14,5	
2	<b>Extrudarea fără US:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>se manifestă defectul piele de rechin;</li> <li>polimer netransparent - datorat temperaturii inferioare celei de normale de procesare a HDPE</li> </ul>						11,9	14
3	<b>Extrudare cu US:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;</li> <li>defectul de tip piele de rechin este eliminat.</li> </ul>						12,1	14,4
4							12,2	14,5
5							11,8	14,5
6							12,1	14,5
7							12,1	14,3
8							12	14,6
9							11,9	14,4
$\Delta Q = \frac{Q_{us} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{14,41 - 12}{12} \cdot 100 = 20,75\% (\approx 21\%)$								

Experiment de tip A 190°C, $d_c = 3,9\text{mm}$ , $h_c = 3,7\text{mm}$ .								
Nr. crt.	Interstițiul de curgere, $l$ [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, $F$ [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, $Z_r$ [ohm]	Temperatura de extrudare, $T$ [°C]	Țiimpul de experimentare, $t$ [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, $Q$ [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]	
1	1,2	38,606	172	190	15	13,2	15,2	
2	<b>Extrudarea fără US:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>se manifestă defectul piele de rechin de dimensiuni mai reduse</li> <li>polimer transparent</li> </ul>						13,3	15,2
3	<b>Extrudare cu US:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;</li> <li>defectul de tip piele de rechin este eliminat;</li> <li>efectul ultrasonic este de intensitate inferioară celui obținut la temperatura de 160°C.</li> </ul>						13,2	15,1
4							13,1	15,1
5							13,3	15,2
6							13,3	15,2
7							13	15,1
8							13,3	15,2
9							13,2	15,2
$\Delta Q = \frac{Q_{us} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{15,2 - 13,2}{13,2} \cdot 100 = 15,15\% (\approx 15\%)$								



Experiment de tip A 220°C,  $d_c = 3,9\text{mm}$ ,  $h_c = 3,7\text{mm}$ .

Nr. crt.	Interstițiul de curgere, l [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, F [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, Z <sub>s</sub> [ohm]	Temperatura de extrudare, T [°C]	Timpul de experimentare, t [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, Q [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, Q <sub>us</sub> [g/s]		
1	1,2	38,771	145	220	15	14,5	15,6		
2	<p><b>Extrudarea fără US:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• curgere fără defecte</li> </ul> <p><b>Extrudare cu US:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• curgerea este laminară;</li> <li>• diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;</li> <li>• posibilă degradare termică.</li> </ul> $\Delta Q = \frac{Q_{us} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{15,5 - 14,4}{14,4} \cdot 100 = 7,63\% (\approx 8\%)$								
3								14,4	15,7
4								14,5	15,6
5								14,4	15,4
6								14,4	15,3
7								14,5	15,7
8								14,5	15,7
9								14,4	15,5

## REZULTATE EXPERIMENTALE - EXPERIMENT DE TIP A



a.

b.

**Figura A7.1.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip A, fără activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



a.

b.

**Figura A7.2.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip A, cu activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



**Figura A7.3.** Extrudat de HDPE la temperatura de 190°C – Experiment de tip A, fără activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.

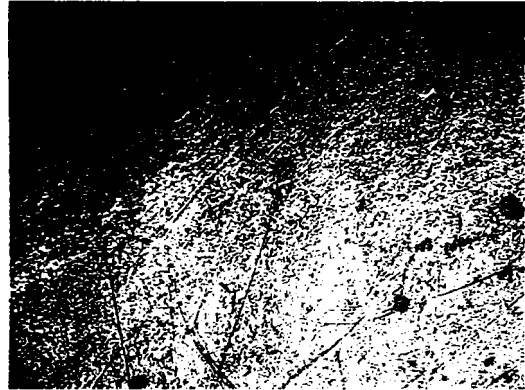


**Figura A7.4.** Extrudat de HDPE la temperatura de 190°C – Experiment de tip A, cu activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



a.



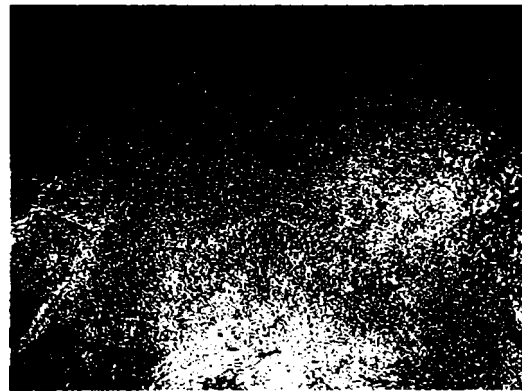
b.

**Figura A7.5.** Extrudat de HDPE la temperatura de 220°C – Experiment de tip A, fără activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



a.



b.

**Figura A7.6.** Extrudat de HDPE la temperatura de 220°C – Experiment de tip A, cu activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.

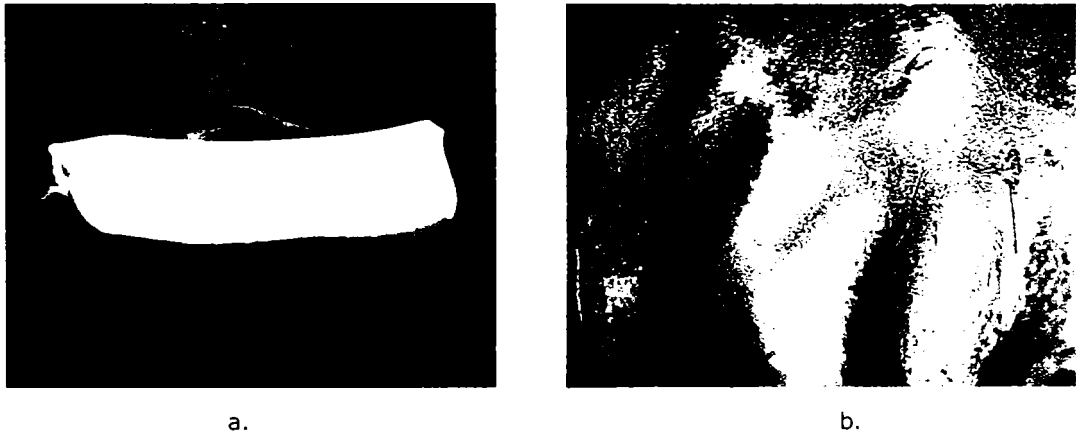
## REZULTATE EXPERIMENTALE - EXPERIMENT DE TIP B

Experiment de tip B 160°C, $d_c = 3,4\text{mm}$ , $h_c = 3,3\text{mm}$ .								
Nr. crt.	Interstițiul de curgere, l [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, F [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, Z, [ohm]	Temperatura de extrudare, T [°C]	Timpul de experimentare, t [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, Q [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]	
1	0,7	38,831	151	160	15	9,5	12,5	
2	<b>Extrudarea fără US:</b>						9,7	12,3
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• se manifestă defectul piele de rechin;</li> <li>• polimer netransparent - datorat temperaturilor inferioare celei de normale de procesare a HDPE</li> </ul>						9,5	12,8
4	<b>Extrudare cu US:</b>						9,3	12,5
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;</li> <li>• defectul de tip piele de rechin este eliminat.</li> </ul>						9,5	12,3
6	$\Delta Q = \frac{Q_{us} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{12,45 - 9,54}{9,54} \cdot 100 = 30,5\% (\approx 30\%)$						9,7	12,5
7							9,7	12,3
8							9,5	12,5
9							9,5	12,4

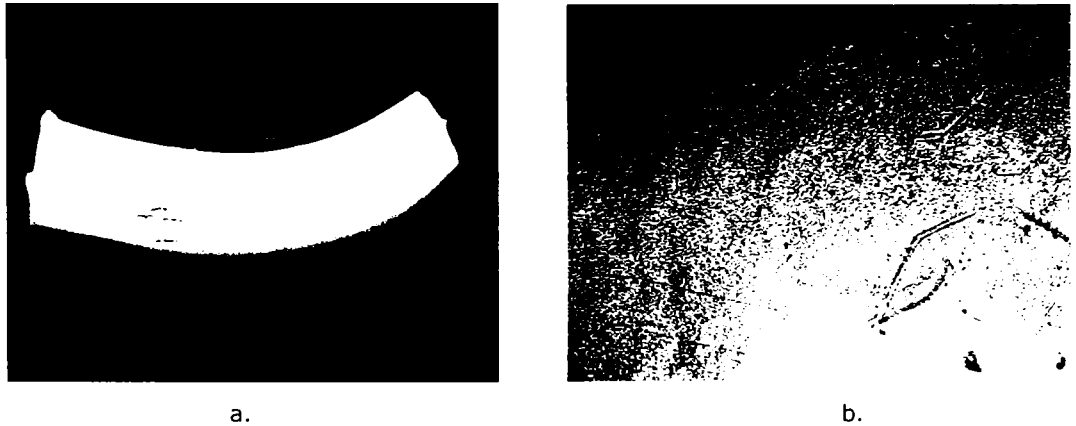
  

Experiment de tip B 190°C, $d_c = 3,4\text{mm}$ , $h_c = 3,3\text{mm}$ .								
Nr. crt.	Interstițiul de curgere, l [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, F [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, Z, [ohm]	Temperatura de extrudare, T [°C]	Timpul de experimentare, t [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, Q [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]	
1	0,7	38,750	160	190	15	11,8	13,9	
2	<b>Extrudarea fără US:</b>						12	14,4
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• se manifestă defectul piele de rechin, dar de dimensiuni inferioare temperaturii de 160°C;</li> </ul>						11,9	13,9
4	<b>Extrudare cu US:</b>						11,9	14,2
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• curgerea este laminară;</li> <li>• diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;</li> <li>• extrudat fără defecte.</li> </ul>						12	14,1
6	$\Delta Q = \frac{Q_{us} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{14,15 - 11,95}{11,95} \cdot 100 = 18,41\% (\approx 18\%)$						11,9	14,3
7							12	14,1
8							12	14,2
9							12,1	14,3

Experiment de tip B 220°C, $d_c = 3,4\text{mm}$ , $h_c = 3,3\text{mm}$ .								
Nr. crt.	Interstițiul de curgere, $l$ [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, $F$ [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, $Z$ , [ohm]	Temperatura de extrudare, $T$ [°C]	Timpul de experimentare, $t$ [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, $Q$ [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]	
1	0,7	38,705	145	220	15	12,9	14,5	
2	<p><b>Extrudarea fără US:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• curgere laminară, fără defecte;</li> </ul> <p><b>Extrudare cu US:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• curgerea este laminară;</li> <li>• diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;</li> <li>• polimerul prezintă semne de îngălbenire ca urmare a deteriorării termice.</li> </ul> $\Delta Q = \frac{Q_{us} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{14,65 - 12,93}{12,93} \cdot 100 = 13,3\% (\approx 13\%)$						12,8	14,7
3							13,1	14,8
4							13	14,6
5							12,9	14,7
6							12,9	14,5
7							12,9	14,7
8							13	14,7
9							12,9	14,7

**REZULTATE EXPERIMENTALE - EXPERIMENT DE TIP B**

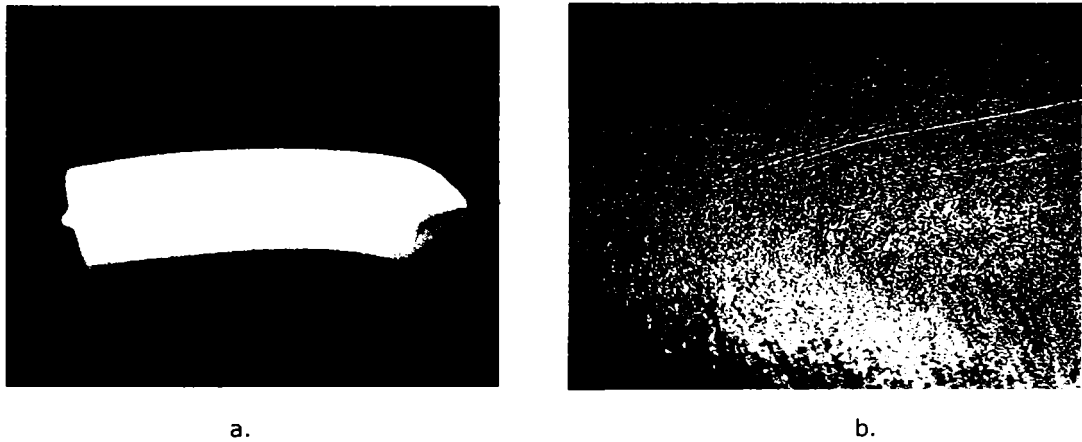
**Figura A8.1.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C - Experiment de tip B, fără activare ultrasonică.  
**a** - extrudat HDPE, vedere normală; **b** - vedere mărită la 250x.



**Figura A8.2.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C - Experiment de tip B, cu activare ultrasonică.  
**a** - extrudat HDPE, vedere normală; **b** - vedere mărită la 250x.

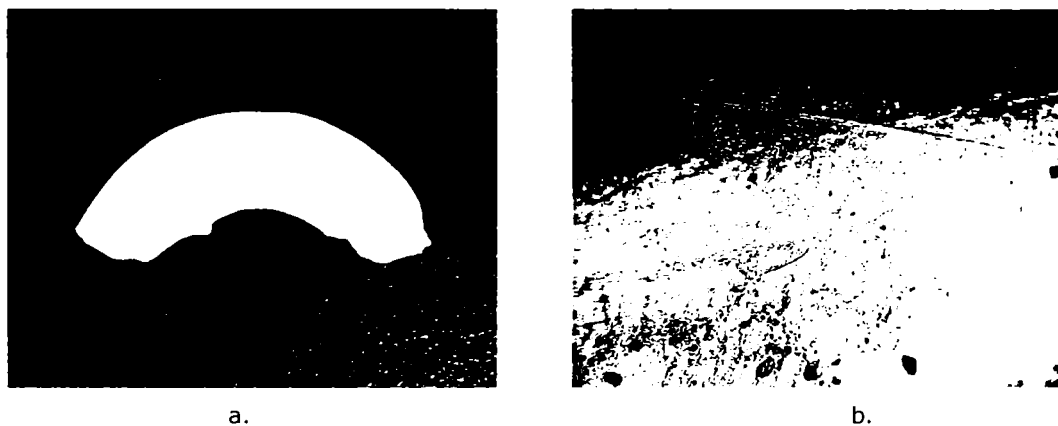


**Figura A8.3.** Extrudat de HDPE la temperatura de 190°C – Experiment de tip B, fără activare ultrasonică.  
**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.

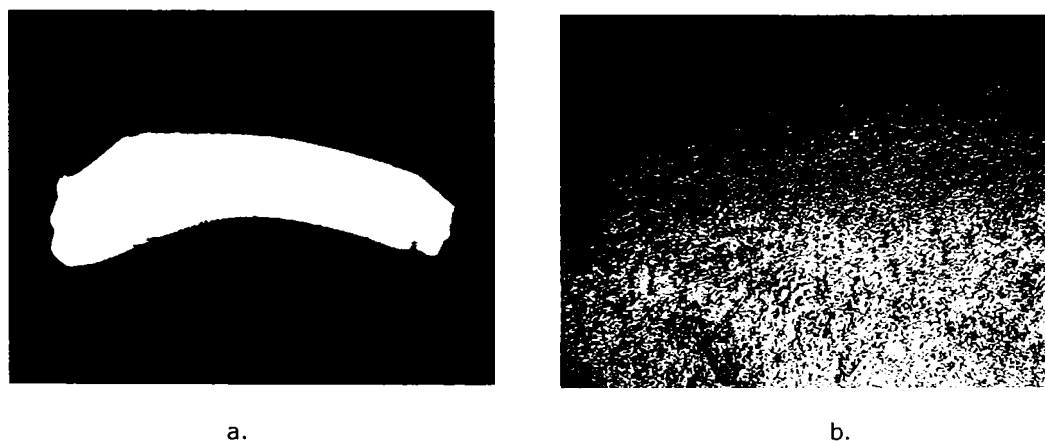


**Figura A8.4.** Extrudat de HDPE la temperatura de 190°C – Experiment de tip B, cu activare ultrasonică.  
**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.





**Figura A8.5.** Extrudat de HDPE la temperatura de 220°C - Experiment de tip B, fără activare ultrasonică.  
**a** - extrudat HDPE, vedere normală; **b** - vedere mărită la 250x.



**Figura A8.6.** Extrudat de HDPE la temperatura de 220°C - Experiment de tip B, cu activare ultrasonică.  
**a** - extrudat HDPE, vedere normală; **b** - vedere mărită la 250x.

## REZULTATE EXPERIMENTALE - EXPERIMENT DE TIP C

**Experiment de tip C 160°C,  $d_0 = 2\text{mm}$ ,  $h_c = 4.5\text{mm}$ .**

Nr. crt.	Interstițiul de curgere, $l$ [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, $F$ [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, $Z$ , [ohm]	Temperatura de extrudare, $T$ [°C]	Timpul de experimentare, $t$ [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, $Q$ [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]
1	1	38.683	145	160	15	11.9	14.9
2	<b>Extrudarea fără US:</b>						
3	• curgere sacadată;						
4	• se manifestă defectul piele le rechin;						
5	• polimer netransparent - datorat temperaturilor inferioare celei de normale de procesare a HDPE						
6	<b>Extrudare cu US:</b>						
7	• diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;						
8	• defectul de tip piele de rechin este eliminat.						
9	$\Delta Q = \frac{Q_{ts} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{14.8 - 11.97}{11.97} \cdot 100 = 23.64\% (\approx 24\%)$						

**Experiment de tip C 190°C,  $d_0 = 2\text{mm}$ ,  $h_c = 4.5\text{mm}$ .**

Nr. crt.	Interstițiul de curgere, $l$ [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, $F$ [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, $Z$ , [ohm]	Temperatura de extrudare, $T$ [°C]	Timpul de experimentare, $t$ [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, $Q$ [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]
1	1	38.650	142	190	15	13.8	15.5
2	<b>Extrudarea fără US:</b>						
3	• curgere ușor sacadată;						
4	• defectul piele de rechin de intensitate mai redusă decât cel manifestat la 160°C;						
5	<b>Extrudare cu US:</b>						
6	• diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extr. dăni fără US;						
7	• curgere laminară, fără defecte.						
8	$\Delta Q = \frac{Q_{ts} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{15.6 - 13.7}{13.7} \cdot 100 = 13.86\% (\approx 14\%)$						

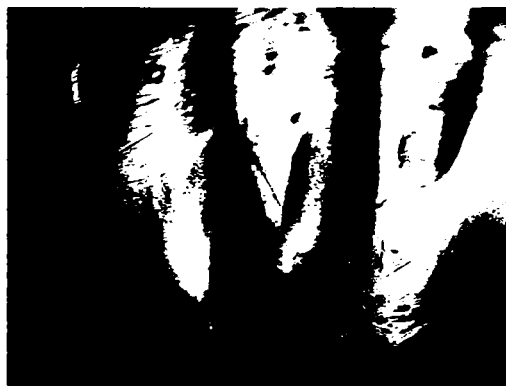
**Experiment de tip C 220°C,  $d_0 = 2\text{mm}$   $h_c = 4,5\text{mm}$ .**

Nr. crt.	Interstițiul de curgere, $l$ [mm]	Frecvența de rezonanță la temperatura de regim, $F$ [kHz]	Impedanța specifică la temperatura de regim, $Z_s$ [ohm]	Temperatura de extrudare, $T$ [°C]	Timpul de experimentare, $t$ [sec]	Debitul de material extrudat fără ultrasunete, $Q$ [g/s]	Debitul de material extrudat cu ultrasunete, $Q_{us}$ [g/s]
1	1	38.611	156	220	15	13,8	15,7
2	<b>Extrudarea fără US:</b>						
3	• curgere laminară, fără defecte;						
4	<b>Extrudare cu US:</b>						
5	• curgerea este laminară;						
6	• diametrul extrudatului la ieșirea din duză este mai mic decât în cazul extrudării fără US;						
7	• polimerul prezintă semne de îngălbenire ca urmare a deteriorării termice.						
8	$\Delta \bar{Q} = \frac{Q_{us} - Q}{Q} \cdot 100 = \frac{15,65 - 13,94}{13,94} \cdot 100 = 12,26\% (\approx 12\%)$						
9						14	15,7

## REZULTATE EXPERIMENTALE - EXPERIMENT DE TIP C



a.



b.

**Figura A9.1.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip C, fără activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



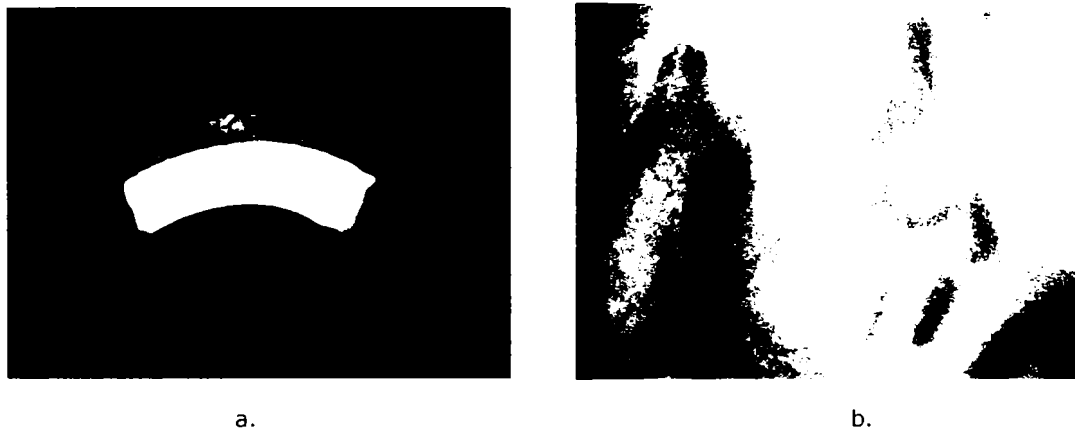
a.



b.

**Figura A9.2.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip C, cu activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



**Figura A9.3.** Extrudat de HDPE la temperatura de 190°C – Experiment de tip C, fără activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.

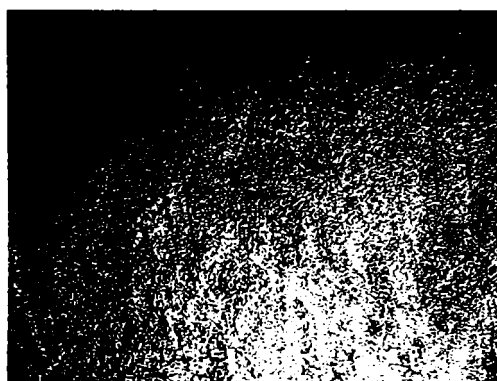


**Figura A9.4.** Extrudat de HDPE la temperatura de 190°C – Experiment de tip C, cu activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



a.



b.

**Figura A9.5.** Extrudat de HDPE la temperatura de 220°C – Experiment de tip C, fără activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.



a.

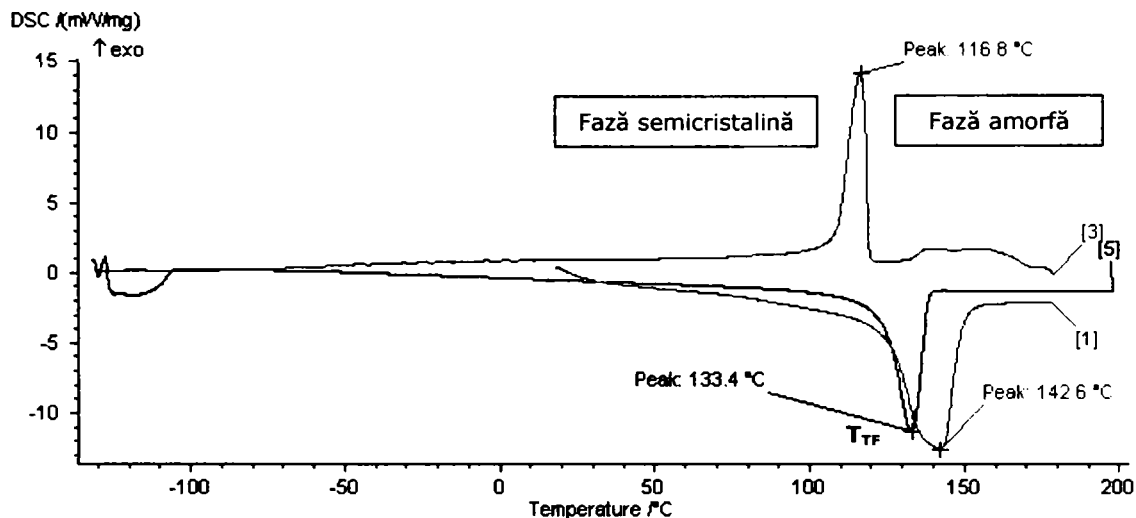


b.

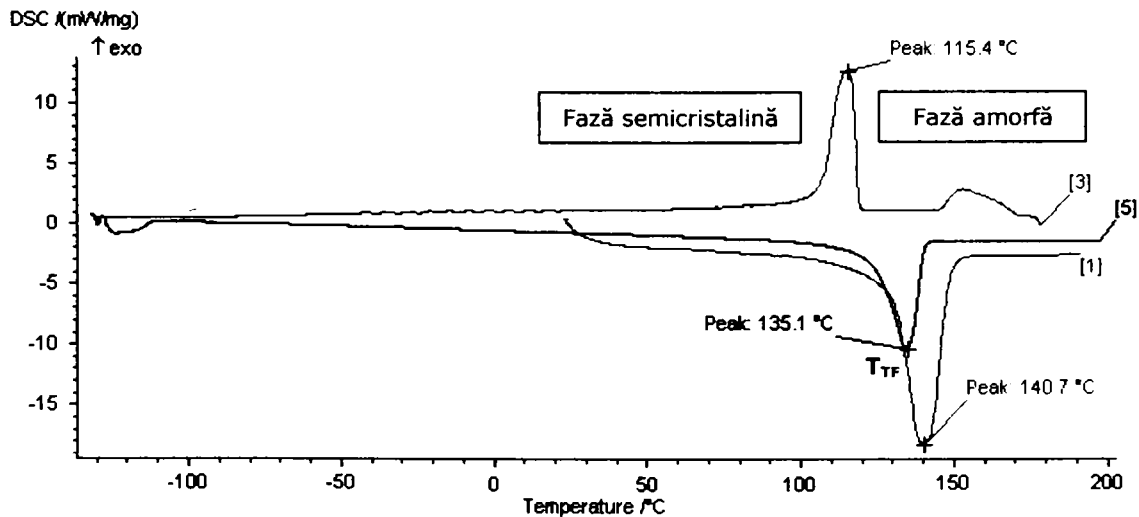
**Figura A9.6.** Extrudat de HDPE la temperatura de 220°C – Experiment de tip C, cu activare ultrasonică.

**a** – extrudat HDPE, vedere normală; **b** – vedere mărită la 250x.

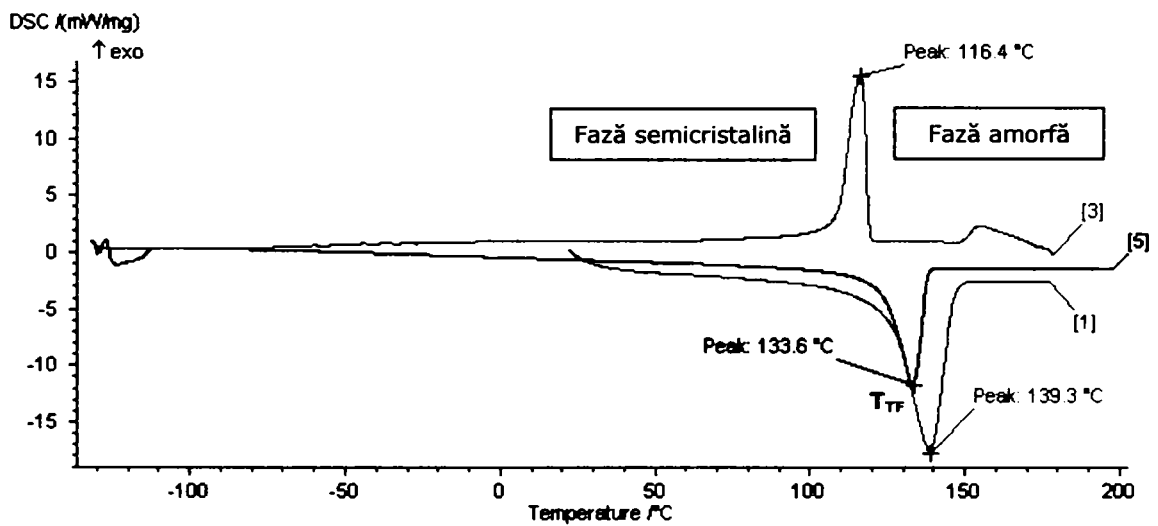
## Rezultatele experimentale ale tranziției de stare a polimerului folosind analiza DSC (Differential Scanning Calorimeter)



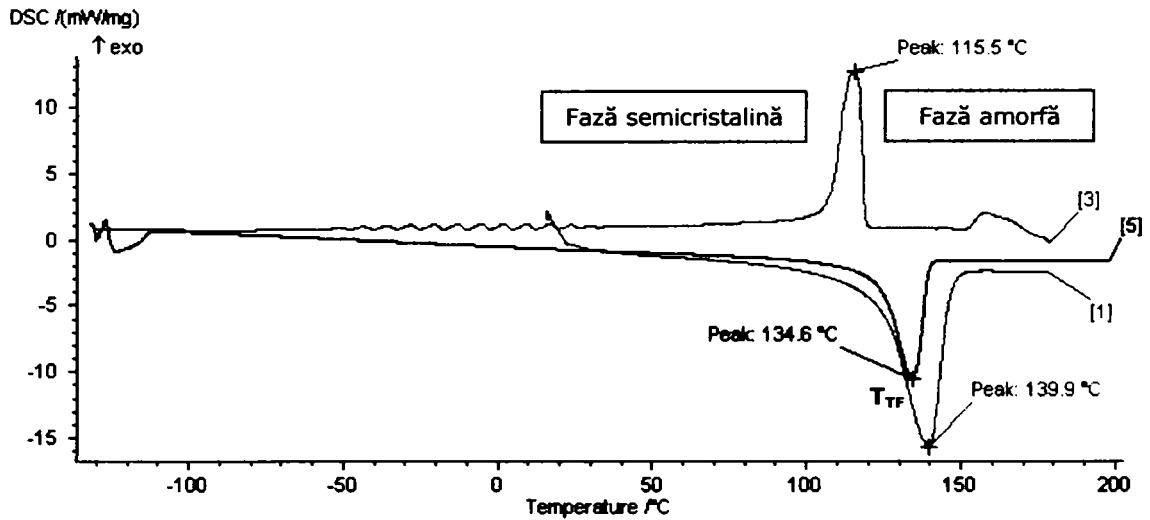
**Figura A10.1.** Granule polimerice virgine - punerea în evidență a curbelor de încălzire (curba 1) și răcire (curba 3) în vederea detensionării și a curbei reale a temperaturii de tranziție de fază, de transformare a fazei cristaline în fază amorfă -  $T_{TF}$  (curba 5)



**Figura A10.2.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C - Experiment de tip A, fără activare ultrasonică cu punerea în evidență a curbelor de încălzire (curba 1) și răcire (curba 3) în vederea detensionării și a curbei reale a temperaturii de tranziție de fază, de transformare a fazei cristaline în fază amorfă -  $T_{TF}$  (curba 5)

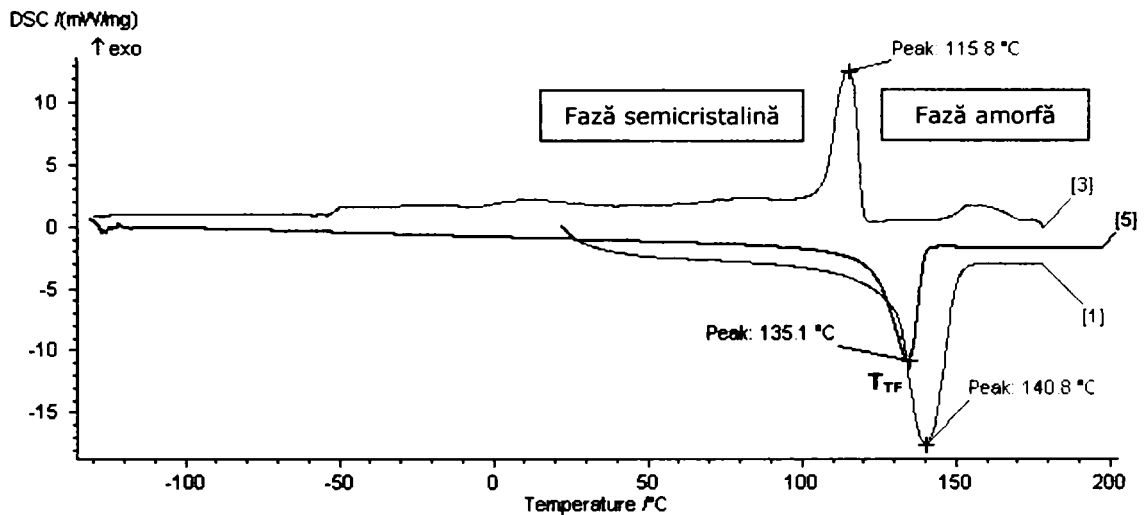


**Figura A10.3.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip A, cu activare ultrasonică cu punerea în evidență a curbelor de încălzire (curba 1) și răcire (curba 3) în vederea detensionării și a curbei reale a temperaturii de tranziție de fază, de transformare a fazei cristaline în fază amorfă –  $T_{TF}$  (curba 5)

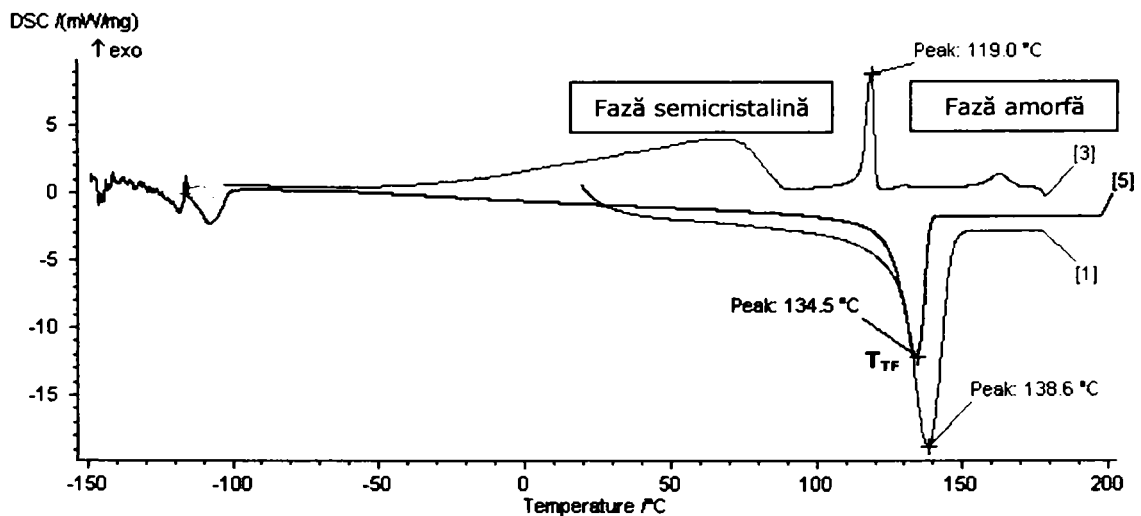


**Figura A10.4.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip B, fără activare ultrasonică cu punerea în evidență a curbelor de încălzire (curba 1) și răcire (curba 3) în vederea detensionării și a curbei reale a temperaturii de tranziție de fază, de transformare a fazei cristaline în fază amorfă –  $T_{TF}$  (curba 5)

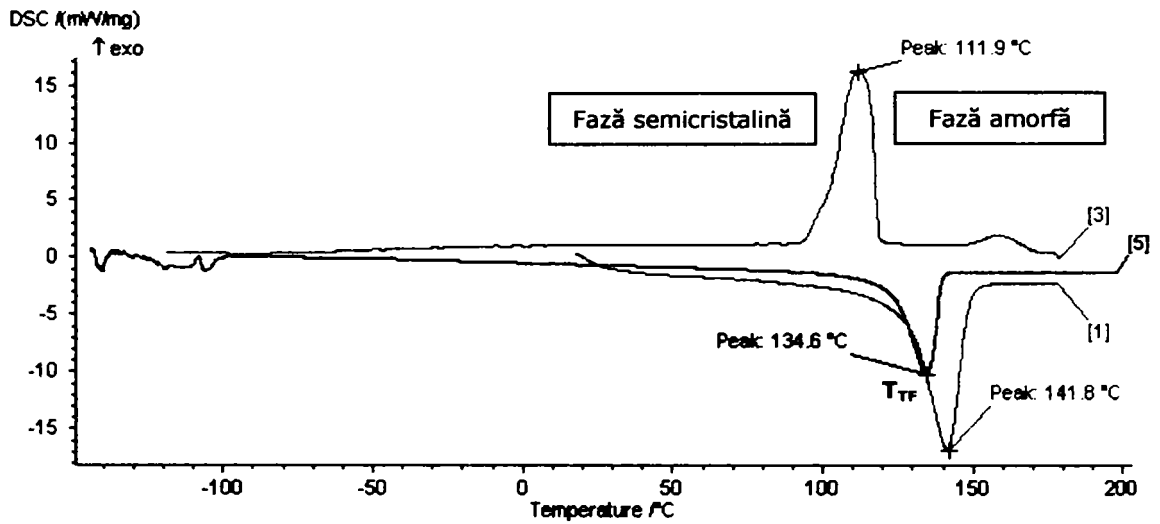




**Figura A10.5.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip B, cu activare ultrasonică cu punerea în evidență a curbelor de încălzire (curba 1) și răcire (curba 3) în vederea detensionării și a curbei reale a temperaturii de tranziție de fază, de transformare a fazei cristaline în fază amorfă –  $T_{TF}$  (curba 5)



**Figura A10.6.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip C, fără activare ultrasonică cu punerea în evidență a curbelor de încălzire (curba 1) și răcire (curba 3) în vederea detensionării și a curbei reale a temperaturii de tranziție de fază, de transformare a fazei cristaline în fază amorfă –  $T_{TF}$  (curba 5)



**Figura A10.7.** Extrudat de HDPE la temperatura de 160°C – Experiment de tip C, cu activare ultrasonică cu punerea în evidență a curbelor de încălzire (curba 1) și răcire (curba 3) în vederea detensionării și a curbei reale a temperaturii de tranziție de fază, de transformare a fazei cristaline în fază amorfă -  $T_{TF}$  (curba 5)

## Titluri recent publicate în colecția „TEZE DE DOCTORAT” seria 8: Inginerie Industrială

---

1. **Gheorghe Marcel Mocuța** – *Contribuții la reducerea intensității energetice în județul Bihor*, ISBN 978-973-625-517-5, (2007);
  2. **Marius Iulian Tamas** – *Studiul măririi capacităților de producție ale mașinilor de prototipare rapidă prin prelevare de material*, ISBN 978-973-625-611-0, (2008);
  3. **Cristian Cosma** – *Studii privind optimizarea tehnicii de Reverse Engineering la realizarea produselor injectate din materiale plastice*, ISBN 978-973-625-612-7, (2008).
  4. **Cristian Dan Duran** – *Aspecte privind evaluarea riscului ca sursă a deciziei la nivelul firmei*, ISBN 978-973-625-554-0, (2008);
  5. **Laurențiu Călin** – *Contribuții la optimizarea sistemelor tehnologice de uscare a produselor cerealiere*, ISBN 978-973-625-534-2, (2008);
  6. **Sorin Vasile Savu** – *Senzori nanostructurați pentru sistemele de sudare hibride laser-arc*, ISBN 978-973-625-752-0, (2008);
  7. **Steliana Vatau** – *Optimizarea constructive-funcțională a roboților mobile patrupezi*, ISBN 978-973-625-753-7, 2008;
  8. **Marcel Mircea Pîrvu** – *Contribuții privind managementul îmbunătățirii continue în sisteme inginerești*, ISBN 978-973-625-758-2, (2008);
  9. **Adrian-Ilie Dume** – *Cercetări privind îmbunătățirea tehnicilor de prototipare rapidă prin frezare*, ISBN 978-973-625-767-4, (2008);
  10. **Mihaiel Sorin Vartolomei-Malenovschi** – *Contribuții la managementul energiei și transformării în industria militară, în contextul „jocului” suprastatal*, ISBN 978-973-625-803-9, (2009).
- 



EDITURA POLITEHNICA