

STUDIUL ACTIVĂRII ULTRASONICE A PROCESELOR DE CURGERE A MATERIALELOR POLIMERICE TERMOPLASTICE CU APLICARE LA PROCEDEELE DE MICROINJECTARE ȘI INJECTARE A PIESELOR CU PEREȚI SUBȚIRI

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

ing. Șerban Iancu-Șerban

Conducători științifici: prof.univ.dr.ing. Tudor Iclănzan
prof.univ.dr.ing. Patricia Krawczak
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Gheorghe Achimaș
prof.univ.dr.ing. Petru Berce
conf.univ.dr.ing. Daniel Stan

Ziua susținerii tezei: 23 februarie 2012

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, 2006

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

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului Ingineria Materialelor și Fabricației al Universității „Politehnica” din Timișoara, Departamentului "Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique" din cadrul Ecole des Mines de Douai din Franța și Institutului Național de Cercetare – Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorilor de doctorat prof. dr. ing. Tudor Iclănzan și prof. dr. ing. Patricia Krawczak, colectivelor celor trei instituții în care mi-am desfășurat activitatea de cercetare doctorală și nu în ultimul rând familiei.

Timișoara, februarie 2012

Șerban Iancu-Șerban

Șerban, Iancu-Șerban

Studiul activării ultrasonice a proceselor de curgere a materialelor polimerice termoplastice cu aplicare la procedeele de microinjectare și injectare a pieselor cu pereți subțiri

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 41, Editura Politehnica, 2012, 160 pagini, 158 figuri, 16 tabele.

ISSN: 1842-8967

ISBN: 978-606-554-456-7

Cuvinte cheie: microinjectare, activare ultrasonică, piese cu pereți subțiri, polimeri, concentrator adaptor de undă

Rezumat: Un capitol aparte al procedeelelor de punere în formă a materialelor polimerice îl reprezintă microinjectarea și injectarea pieselor cu pereți subțiri, procedee caracterizate prin obținerea unor repere de mase și dimensiuni foarte mici (inferioare valorilor de 0,1g respectiv de 1mm). Datorită limitelor dimensionale care particularizează aceste procedee, obținerea pieselor miniaturale se face oarecum dificil, existând probleme atât în ceea ce privește umplerea cavităților de formare cât și în evacuarea pieselor injectate, de multe ori calitatea produselor finale având de suferit. În vederea înlăturării acestor neajunsuri, prezenta teză propune o metodologie neconvențională de procesare a micropieselor bazată pe activarea ultrasonică a procedeelelor de microinjectare și de injectare a pieselor cu pereți subțiri. Activarea ultrasonică a microinjectării și injectării pieselor cu pereți subțiri s-a realizat prin implementarea unor sisteme ultrasonice compuse din generator, transductor piezoelectric și concentrator adaptor de undă în structura unor mașini clasice de injectat. Compatibilitatea dintre elementele componente ale platformei experimentale s-a obținut prin adaptarea tehnologică și reproiectarea a unora dintre ele

Cuprins

Cuprins	5
INTRODUCERE	8
1. CERCETĂRI TEORETICE CU PRIVIRE LA ACTIVAREA ULTRASONICĂ A CURGERII POLIMERILOR	10
1.1. Noțiuni generale referitoare la undele ultrasonice.....	10
1.2. Mărimi acustice caracteristice ultrasunetelor.....	16
1.3. Construcția sistemelor ultrasonice	19
1.4. Generatorul ultrasonic	21
1.5. Transductoarele ultrasonice	23
1.6. Concentratoarele adaptoare de undă (sonotrodele)	27
1.7. Efectele posibile generate de acțiunea ultrasunetelor asupra materialelor polimerice topite în stare de curgere	32
1.7.1. Efectul de suprafață (reducere a frecării)	32
1.7.2. Înmuierea acustică	33
1.7.3. Absorbția energiei undei și transformarea ei în energie termică	34
1.7.4. Efectul ultrasonic termo-pelicular	35
1.8. Aplicații ale activării ultrasonice la procedeele de punere în formă a materialelor polimerice (extrudare și injectare)	37
1.8.1. Matrițe pentru injectarea materialelor polimerice activată ultrasonic ..	37
1.8.2. Extrudarea materialelor termoplastice activate ultrasonic	38
2. OBIECTIVELE CERCETĂRII TEZEI	41
2.1. Studiul activării ultrasonice a curgerii polimerilor și sinteza rezultatelor experimentale privind efectul termopelicular (extras rezumativ - Teză de doctorat „Studiul activării ultrasonice a proceselor de injectare și extrudare a materialelor termoplastice” [STA 99])	43
2.2. Programul de cercetare și dezvoltare ULTRA-MELT	51
2.3. Brevete de invenție pentru matrițe de injectare activate ultrasonic	53
2.4. Injectarea ultrasonică prin adaptări pe echipamente de tip industrial	57
2.5. Injectarea pieselor cu pereți subțiri	58
2.6. Microinjectarea	59
3. ADAPTAREA ECHIPAMENTULUI ULTRASONIC LA PROCES	63
3.1. Adaptarea echipamentelor ultrasonice utilizate	63
3.1.1. Echipamentul ultrasonic de lucru	63

3.1.2. Aparatura de verificare și testare	66
3.2. Proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă	69
3.2.1. Proiectarea concentratoarelor cilindrice în trepte cu ajutorul relațiilor de calcul	71
3.2.2. Proiectarea concentratoarelor ultrasonice asistată de calculator.....	75
3.2.3. Realizarea documentației de execuție a elementelor ce alcătuiesc ansamblul ultrasonic.....	84
3.2.4. Desenul de execuție al întregului convertor ultrasonic	85
3.3. Finalizarea proiectării concentratoarelor adaptoare de undă și testarea lor.	86
3.3.1. Ajustarea finală a concentratoarelor adaptoare de undă	86
3.3.2. Testarea unor caracteristici acustice ale concentratoarelor	87
4. STUDIUL PARAMETRILOR DE CURGERE AI INJECTĂRII MATERIALELOR POLIMERICE ACTIVATE ULTRASONIC LA FABRICAREA PIESELOR CU PEREȚI SUBȚIRI	95
4.1. Studiul curgerii materialului polimeric la injectarea pieselor cu pereți subțiri	95
4.1.1. Mașina de injectat materiale plastice	95
4.1.2. Duza reologică de injectare	97
4.2. Descrierea adaptărilor tehnologice realizate	99
4.3. Simularea comportamentului concentratorului	102
4.4. Încercări pe mașina de injectat	105
4.4.1. Plan experimental pentru studiul parametrilor de proces la injectarea pieselor cu pereți subțiri.....	106
4.4.2. Injectări cu filiera de $\phi 1$ mm de lungime 10 mm (raport $L/\phi = 10$)	107
4.4.3. Injectări cu filiera de $\phi 1$ mm de lungime 20 mm (raport $L/\phi = 20$) ...	110
4.4.4. Injectări cu filiera de $\phi 1$ mm de lungime 30 mm (raport $L/\phi = 30$)	114
4.4.5. Injectări cu filiera de $\phi 0,3$ mm de grosime 10 mm (raport $L/\phi = 33,33$)	117
4.4.6. Injectări cu filiera de $\phi 0,3$ mm de lungime 20 mm (raport $L/\phi = 66,66$)	121
4.5. Rezultate experimentale obținute, interpretări și concluzii	123
5. ACTIVAREA ULTRASONICĂ A PROCESULUI DE MICROINJECTARE A MATERIALELOR POLIMERICE	128
5.1. Analiza soluției tehnice privind matrița de microinjectat activată cu ultrasunete.....	128
5.2. Descrierea platformei experimentale	132
5.3. Obținerea cavității de formare	137
5.4. Realizarea planului de experimente și a încercărilor experimentale	143

5.5. Interpretarea rezultatelor experimentale și concluzii	145
6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	152
6.1. Concluzii	152
6.2. Contribuții personale.....	153
6.3. Direcții viitoare de cercetare	154
7. BIBLIOGRAFIE	155

INTRODUCERE

Plasturgia reprezintă un sector de producție al industriei aflat în plină dezvoltare și care înregistrează ritmuri continue de creștere în ultimii 50 de ani determinate de apariția de noi materiale polimerice și de specializarea procedeelor de procesare.

Polimerii, în raport cu materialele convenționale (aliaje metalice, lemn, sticlă), prezintă o serie de avantaje cum ar fi: prelucrabilitate excelentă (pot fi puși în formă cu ușurință), preț redus, masă specifică mică raportată la proprietățile mecanice, conductivitate termică și electrică redusă (sunt folosite ca materiale izolatoare) și posibilitatea de a fi procesați în forme complexe.

Un capitol aparte al procedeelor de punere în formă a materialelor polimerice îl constituie microinjectarea și injectarea pieselor cu pereți subțiri, caracterizate prin obținerea unor repere de mase și dimensiuni foarte mici (inferioare valorilor de 0,1g respectiv de 1mm).

În ultimii ani, utilizarea pieselor de dimensiuni miniaturale din materiale polimerice s-a extins în diverse domenii (industria aeronautică, industria auto, industria medicală, industria electronică), fiecare aplicație necesitând configurații diferite și forme mai mult sau mai puțin complexe.

Tocmai datorită limitelor dimensionale menționate, obținerea pieselor miniaturale se face oarecum dificil, existând probleme atât în ceea ce privește umplerea cavităților de formare, cât și în evacuarea pieselor injectate, de multe ori calitatea produselor finale având de suferit. Pentru a înlătura aceste neajunsuri specifice, prezenta teză propune o metodologie neconvențională de procesare a micropieselor bazată pe activarea ultrasonică a procedeelor de microinjectare și injectare a pieselor cu pereți subțiri.

Beneficiile acțiunii energiei ultrasonice asupra curgerii materialelor polimerice au fost puse în lumină de diferite cercetări care au avut ca scop activarea ultrasonică a unor matrițe clasice de injectare cu canale calde sau a extrudării materialelor termoplastice. Pe lângă obținerea unor produse superioare calitativ, activarea ultrasonică a determinat diminuări ale timpilor de fabricație precum și reduceri semnificative ale consumului energetic.

Capitolul 1, intitulat **Cercetări teoretice cu privire la activarea ultrasonică a curgerii polimerilor**, prezintă o serie de noțiuni generale referitoare la undele acustice, o clasificare a lor în funcție de mai multe criterii, precum și principalele mărimi fizice care le caracterizează. De asemenea, în acest capitol sunt cuprinse informații referitoare la construcția sistemelor ultrasonice și componentele care intră în alcătuirea lor (generatoarele de ultrasunete, transductoarele ultrasonice și concentratoarele adaptoare de undă). În continuare sunt descrise efectele generate de acțiunea ultrasunetelor asupra materialelor polimerice topite aflate în stare de curgere (efectul de suprafață, înmuierea acustică și absorbția energiei undei și transformarea ei în energie termică), a căror acțiune simultană și cumulată a fost denumită *efect ultrasonic termopelicular*. Consecințele acestui efect au fost puse în valoare printr-o serie de aplicații tehnologice ale activării ultrasonice a unor procedee de punere în formă a materialelor polimerice (injectare și extrudare).

În **Capitolul 2**, intitulat **Obiectivele cercetării tezei**, sunt prezentate mai multe cercetări teoretice și experimentale care au condus la formularea țintelor lucrării de față. Au fost descrise: un studiu al activării ultrasonice a curgerii polimerilor, o sinteză a rezultatelor experimentale care au pus în evidență efectul ultrasonic termopelicular precum și prezentarea injectării polimerilor activată ultrasonic realizată pe echipamente de tip industrial. Capitolul mai cuprinde o

prezentare a programului de cercetare și dezvoltare ULTRA-MELT, o sinteză a unor brevete de invenție pentru matricele de injectare activate ultrasonic și noțiuni teoretice cu privire la microinjectare și injectarea pieselor cu pereți subțiri.

Capitolul 3, intitulat **Adaptarea echipamentului ultrasonic la proces**, debutează cu descrierea echipamentelor ultrasonice și a aparaturii de verificare și testare folosite de-a lungul încercărilor experimentale efectuate în teză. În continuare este prezentat algoritmul de proiectare al concentratoarelor adaptoare de undă cu ajutorul relațiilor de calcul respectiv asistat de calculator. Capitolul se încheie cu testarea caracteristicilor acustice ale concentratoarelor, urmată de ajustarea lor constructivă în vederea funcționării în regim de rezonanță cu restul sistemului ultrasonic.

Capitolul 4 poartă titlul **Studiul parametrilor de curgere ai injectării materialelor polimerice activate ultrasonic la fabricarea pieselor cu pereți subțiri** și conține o descriere a mașinii de injectat materiale plastice folosite, cu atenție deosebită îndreptată asupra duzei reometrice, celula de măsură a parametrilor reologici. Capitolul mai conține descrierile adaptărilor tehnologice la care a fost supusă duza în vederea facilitării activării ultrasonice a procesului de curgere a materialului injectat. Au fost prezentate încercările realizate pe mașina de injectat, rezultatele experimentale obținute, interpretarea lor și concluziile aferente.

În **Capitolul 5**, intitulat **Activarea ultrasonică a procesului de microinjectare a materialelor polimerice**, sunt prezentate analiza soluției tehnice privind matricea de microinjectat activată cu ultrasunete, descrierea platformei experimentale folosite pentru realizarea încercărilor de injectare și modalitatea în care a fost obținută cavitatea de formare specifică procesului de microinjectare. Capitolul mai cuprinde planul de experimente conceput alături de încercările corespunzătoare, interpretarea rezultatelor obținute și concluziile formulate.

Capitolul 6, Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare, sintetizează rezultatele experimentale obținute alături de observațiile și interpretările autorului, prezentând de asemenea și perspectivele de cercetare care se întrevăd în viitorul apropiat.

1. CERCETĂRI TEORETICE CU PRIVIRE LA ACTIVAREA ULTRASONICĂ A CURGERII POLIMERILOR

1.1. Noțiuni generale referitoare la undele ultrasonice

Energia de vibrație pe care o posedă un corp la un moment dat se transmite mediului înconjurător punând în mișcare particulele acestuia. În felul acesta se produce o perturbație care se transmite din aproape în aproape prin mediul elastic, creându-se unde elastice. Deplasarea undelor elastice prin mediul de propagare se face prin comprimări ale lor alternate cu expansiuni (figura 1.1). O categorie importantă a undelor elastice o constituie undele acustice [BĂD 67].



Fig. 1.1. Modul de propagare al unei acustice

Undele acustice se clasifică, din punct de vedere al frecvenței cu care se propagă, în mai multe subcategorii [AMZ 06]:

- undele infrasonore, care au frecvențe inferioare frecvenței sunetului celui mai grav perceput de organul auditiv uman ($f = 0,5...20$ Hz);
- undele sonore, care au frecvențe percepute de organul auditiv uman, producând totodată senzația de auz ($f = 20...20000$ Hz);

- undele ultrasonore (ultrasunetele), care au frecvențe superioare frecvenței sunetului cel mai înalt perceput urechea umană (între 20000 și $10^9 \dots 10^{10}$ Hz);
- undele hipersonore, care au frecvențe foarte ridicate și nu se supun legilor clasice ale mecanicii. Pentru ele se aplică legile mecanicii cuantice, domeniul lor începând de la 10^{10} Hz și ținând până la 10^{14} Hz. Lungimile lor de undă lor sunt de ordinul distanțelor interatomice.

Ultrasunetele reprezintă vibrații mecanice care se propagă în medii solide sau fluide de frecvențe superioare valorii de 20 kHz (20.000 de cicluri pe secundă), imperceptibile de către urechea umană. Ultrasunetele pot avea frecvențe chiar de ordinul gigaherzilor (de peste un miliard de cicluri pe secundă).

În funcție de traiectoria pe care o descriu și de forma și dimensiunile mediului de propagare, undele ultrasonice pot fi [AMZ 06, BĂD 67]:

- Unde longitudinale, traiectoria lor este liniară și se face pe direcția propagării undei (figura 1.2). Acest tip de unde se pot forma și propaga în orice mediu elastic (gazos, lichid, solid sau plasmă). Ele produc modificări ale presiunii în medii fluide (comprimări și expandări succesive) și tensiuni alternative de compresiune și întindere în mediile solide. Moleculele mediului vibrează în jurul pozițiilor de echilibru după o traiectorie liniară, paralelă cu direcția de propagare a frontului de undă. Viteza de propagare a undelor este influențată de forțele de interacțiune dintre particulele mediului. Dacă dimensiunile mediului de propagare sunt comparabile cu lungimea undei acustice, atunci undele elastice se numesc cvasilongitudinale.

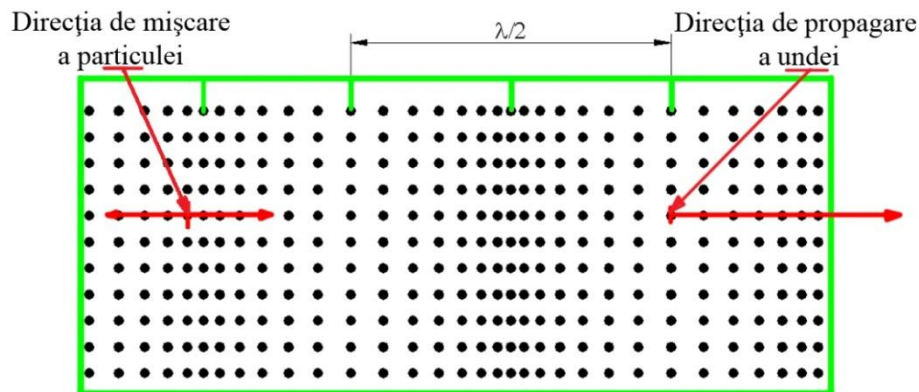


Fig.1.2. Propagarea undelor elastice longitudinale

- Unde transversale, au o traiectorie liniară, deplasarea particulelor făcându-se după o direcție perpendiculară pe direcția propagării undelor (figura 1.3). Aceste unde mai poartă numele și de unde de alunecare, formându-se exclusiv în medii solide deoarece există legături puternice (metalice sau ionice) între atomi sau molecule.

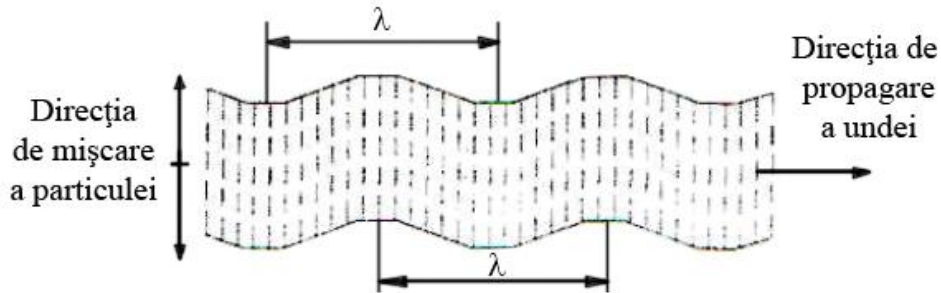


Fig. 1.3. Propagarea undelor elastice transversale; λ – lungimea de undă [AMZ 06]

- Unde de torsiune, traiectoria particulelor mediului este circulară într-un plan perpendicular pe direcția de propagare a frontului de undă. Undele de torsiune apar în medii solide de dimensiuni finite, cum ar fi barele solicitate la torsiune;
- Unde Rayleigh, traiectoria particulelor este un cerc cu centrul în punctul lor de repaus, cerc situat într-un plan paralel cu direcția de propagare a frontului de undă. Acest tip de unde mai poartă numele de unde de suprafață și apar pe suprafața liberă a unui corp solid sau a unui mediu lichid. Sub acțiunea acestor unde, suprafața corpului va efectua o mișcare longitudinală și una transversală, moleculele executând o traiectorie eliptică la trecerea frontului de undă (figura 1.4).

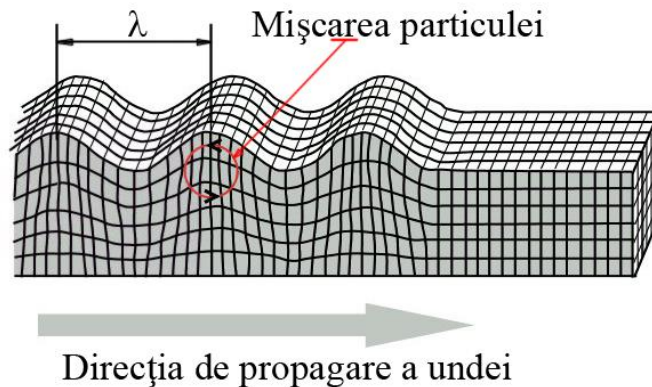


Fig. 1.4. Propagarea undelor Rayleigh [www.wikipedia.org]

- Unde Lamb, generate în plăci sau bare subțiri, depind de lungimea de undă, tipul materialului și dimensiunile mediului de propagare. Mișcarea particulei în cazul undelor Lamb este foarte complexă, asemănându-se cu cea a undelor transversale atunci când dimensiunile corpului în care se propagă sunt comparabile cu lungimea de undă, respectiv cu cea a undelor de suprafață atunci când grosimea mediului de propagare este mai mică sau egală decât lungimea de undă. Undele Lamb pot fi simetrice sau asimetrice (figura 1.5).

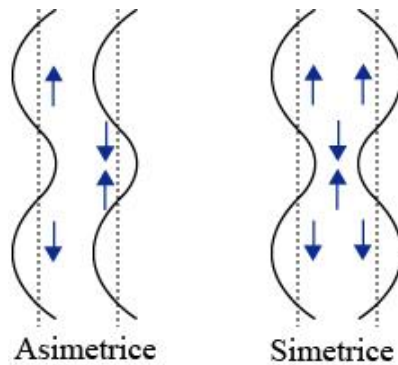


Fig. 1.5. Propagarea undelor Lamb [www.ndt-ed.org]

Porțiunea din mediul acustic care se găsește în stare de vibrație poartă numele de câmp acustic. În cazul particular în care undele acustice produc senzația de auz, câmpul acustic se numește câmp sonor. Atunci când undele acustice au frecvențe superioare valorii de 20 kHz, imperceptibile de către urechea umană, câmpul acustic se intitulă câmp ultrasonor. Locul geometric al tuturor punctelor din câmpul acustic care sunt la un moment dat în fază poartă numele de frontul undei.

Secțiunile normale axei longitudinale (direcția x) a unei bare rectilinii, de secțiune constantă S , supusă unei deformări de tip longitudinal, se deplasează paralel cu ele însele (figura 1.6).

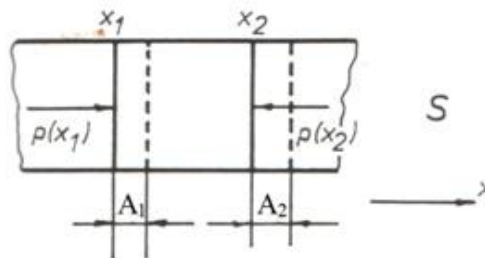


Fig. 1.6. Deformarea longitudinală a unei bare rectilinii de secțiune constantă
 – x_1, x_2 sunt pozițiile succesive ale secțiunii S la diferite momente de timp t .
 – $p(x_1), p(x_2)$ reprezintă eforturile corespunzătoare pozițiilor x_1 și x_2 .
 – A_1, A_2 sunt amplitudinile de vibrații corespunzătoare pozițiilor x_1 și x_2 .
 – x este abscisa sistemului de coordonate.

Secțiunea care la momentul $t=0$ ocupă poziția x_1 se deplasează, la momentul t , în poziția $x_1 + A_1$. Poziția instantanee a unei secțiuni este dată de o funcție complexă $A(x,t)$ care reprezintă deplasarea secțiunii de abscisă x la momentul t . Forțele de legătură de tip elastic derivă din legea lui Hooke, fiind proporționale cu deformația datorată modificării poziției relative a două secțiuni [BĂD 67, ONO 76]:

$$p = -E \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \quad (1.1)$$

unde p este efortul unitar și E este modulul de elasticitate (modulul lui Young).

Efortul p , considerat drept forță de compresiune, reprezintă forța pe unitatea de suprafață cu care mediul, adică bara, acționează asupra unei porțiuni din ea.

14 Cercetări teoretice cu privire la activarea ultrasonică a curgerii polimerilor - 1

Forța de restabilire unitară cu care bara acționează asupra exteriorului este egală și de semn contrar cu efortul unitar.

Ecuția undelor longitudinale în bare de secțiune constantă se obține aplicând legea lui Newton pe o porțiune de bară de grosime dx și de masă specifică ρ :

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \cdot dx = p(x) - p(x + dx) = -E \left(\frac{\partial A}{\partial x} \Big|_x - \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{x+dx} \right) \quad (1.2)$$

care devine:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \quad (1.3)$$

unde

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.4)$$

reprezintă viteza de propagare a undei longitudinale într-un mediu liniar, izotrop, omogen și conservativ.

Ecuția (1.3) reprezintă ecuația de mișcare a barei în absența pierderilor și a forțelor distribuite imprimare și mai poartă numele de ecuația de propagare a undelor. Această ecuație se rezolvă numai prin precizarea condițiilor la limită, prin metoda separării variabilelor [STA 84]:

$$A(x, t) = K \cdot X(x) \cdot e^{st} \quad (1.5)$$

unde s este un număr complex, iar $X(x)$ este amplitudinea de vibrație.

Ecuția (1.3) mai poate fi scrisă sub forma [ACH 83]:

$$A(x, t) = \psi_1(x - ct) + \psi_2(x + ct) \quad (1.6)$$

unde ψ_1 și ψ_2 sunt funcții arbitrare.

În cazul barelor de secțiune variabilă și masă distribuită în lungul lor, forțele de inerție produc în timpul vibrației o anumită distribuție a deplasărilor și a tensiunilor mecanice în funcție de timp t și coordonată x . Ecuția generală care caracterizează propagarea undelor longitudinale în corpuri cu secțiune variabilă este dată de relația [CLE 89, MER 57]:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\mu}{E} \cdot \frac{\partial^3 A}{\partial t \partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\mu}{E} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t \partial x} \right) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

unde S este aria secțiunii transversale variabile cu coordonata x , iar μ este coeficientul de frecare intern.

În ipoteza în care bara de secțiune variabilă e perfect elastică și nedisipativă ($\mu = 0$), ecuația diferențială care descrie legea de variație devine:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \quad (1.8)$$

În cazul în care bara de secțiune variabilă efectuează oscilații armonice produse de o lege de forma [BUZ 75, BUZ 79, SIL 68]:

$$A(x, t) = A(x) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.9)$$

ecuația (1.8) va fi descrisă de ecuația diferențială de ordinul doi numai în funcție de o coordonată:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2 \cdot (1 + j\eta)} \cdot A = 0 \quad (1.10)$$

unde:

- $\omega = 2\pi f$ este pulsația oscilațiilor armonice;
- f este frecvența oscilațiilor;
- $\eta = \mu \cdot \frac{\omega}{E}$ reprezintă un coeficient de pierderi.

Pentru barele cu secțiune variabilă și masă distribuită, confecționate din oțel sau aliaje de aluminiu cu titan (valabil și în cazul concentratoarelor adaptoare de undă), coeficientul de pierderi $\eta = (1,4 \dots 5) \cdot 10^{-4}$ și poate fi neglijat din calcule [AST 81, CHI 80, CLE 89, GRE 80, MAR 72].

Notând numărul de undă cu:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{\lambda f} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.11)$$

unde λ este lungimea de undă, ecuația (1.10) devine:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + k^2 \cdot A = 0 \quad (1.12)$$

Aplicând legea conservării impulsului și a masei în condițiile existenței mai multor ipoteze simplificatoare (ipoteza secțiunii plane, lipsa oscilațiilor transversale parazite, oscilațiile sunt numai longitudinale și variază după o lege armonică, omogenitatea materialului, etc.) [CHI 80, CLE 89, NIC 83], ecuația generală (1.7) devine:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + k^2 \cdot v = 0 \quad (1.13)$$

unde $v = \frac{\partial A}{\partial t}$ este viteza de oscilație a particulelor mediului.

Ecuația de propagare a undelor în bare de secțiune variabilă (1.12) este cunoscută în literatura de specialitate sub numele de ecuația lui Webster și permite determinarea parametrilor acustici ai sistemelor rezonante [STA 84].

1.2. Mărimi acustice caracteristice ultrasunetelor

În tehnică, ultrasunetele sunt definite ca oscilații elastice întreținute în regim de rezonanță a căror frecvență este cuprinsă în intervalul 16 kHz – 3 MHz. Mărimile caracteristice undelor ultrasonice sunt:

- perioada de oscilație, notată cu T [s], definește timpul în care se efectuează o oscilație completă a particulei materiale;
- lungimea de undă, notată cu λ [m], reprezintă distanța parcursă de undă într-o perioadă de oscilație T ;
- frecvența de oscilație, notată cu f [Hz], reprezintă numărul de oscilații efectuate de particula materială într-o secundă;
- viteza undei acustice în mediul de propagare, notată cu C [m/s], definește distanța parcursă de perturbație în unitatea de timp.

Corelațiile dintre aceste mărimi sunt definite prin relațiile:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.14)$$

$$\lambda = \frac{C}{f} = C \cdot T \quad (1.15)$$

Presiunea acustică, notată cu p [N/m^2], definește diferența dintre presiunea totală p_t din mediul de propagare activat ultrasonic și presiunea statică p_0 din mediu:

$$p = p_t - p_0 \quad (1.16)$$

Puterea acustică P este definită de relația:

$$P = S \cdot \frac{p_e}{C} [W] \quad (1.17)$$

unde S reprezintă aria secțiunii transversale prin mediul de propagare [m^2], iar p_e presiunea acustică efectivă [N/m^2].

Intensitatea acustică se definește ca măsura puterii acustice transmisă prin unitatea de arie radiantă:

$$I = \frac{P}{S} [Wm^2] \quad (1.18)$$

Energia totală a unui sistem mecanic oscilatoriu, de amplitudine A și pulsație ω , variază periodic și este egală cu suma energiilor cinetice și potențiale ale sistemului:

$$E_t = E_c + E_p = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot A^2}{2} \quad (1.19)$$

unde

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega t)}{2} \quad (1.20)$$

$$E_p = \frac{k \cdot x^2}{2} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \sin^2(\omega t)}{2} \quad (1.21)$$

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

$$A = A_0 \cdot e^{-\delta t} \quad (1.22)$$

unde δ este coeficientul de amortizare care depinde de proprietățile elasto-plastice ale mediului.

Interacțiunea complexă dintre particulele mediului determină manifestarea fenomenului de rezonanță, atunci când amplitudinea oscilațiilor rămâne constantă, atingând un maxim la o frecvență a forței aplicate denumită frecvență de rezonanță:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (1.23)$$

unde ω_0 [rad/s] este frecvența de rezonanță a sistemului.

Amplitudinea maximă la rezonanță este:

$$A_r = \frac{F_0}{m} \cdot \left(2\delta \cdot \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \right) \quad (1.24)$$

m fiind masa volumului infinitesimal supus oscilației.

Modul de comportare al unui sistem oscilatoriu la rezonanță se caracterizează prin factorul de calitate Q :

$$Q = \omega_r \cdot \frac{m}{r} = \pi \cdot \frac{f_r}{\delta} \quad (1.25)$$

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} \quad (1.26)$$

unde r este factorul de proporționalitate pentru rezistența mecanică a mediului, iar f_r [Hz] este frecvența de rezonanță a sistemului.

Cu cât coeficientul de amortizare este mai mic, valoarea factorului de calitate este mai mare, curba de rezonanță devenind mai ascuțită (diferența $f_2 - f_1$ se reduce) și amplitudinea de rezonanță mai mare (figura 1.7).

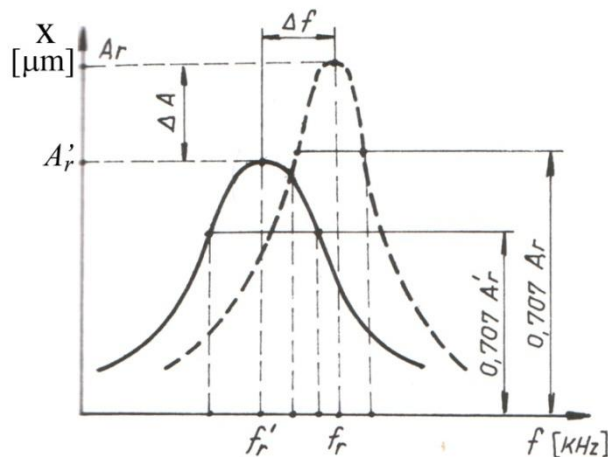


Fig. 1.7. Curbă de rezonanță [KUT 91]

Alunecarea de frecvență este provocată de o amortizare introdusă în sistem care modifică caracteristicile mecano-dinamice ale sistemului rezonant (figura 1.8), determinând deplasarea curbei de rezonanță. Pentru menținerea în regim de rezonanță a sistemului se impune ajustarea frecvenței semnalului generatorului f_a astfel încât $f'_1 < f_a < f'_2$.

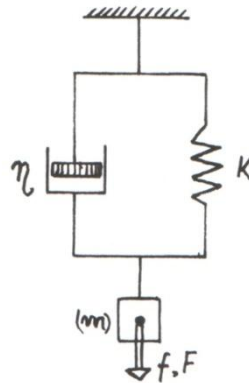


Fig. 1.8. Sistem mecanic echivalent unui ansamblu ultrasonic

În cazul în care mediul de propagare este caracterizat de un comportament elastic ideal ($\delta = 0$), apariția unui maxim al amplitudinilor forțate coroborată cu lipsa amortizării în sistem determină egalizarea frecvenței forței aplicate cu frecvența oscilațiilor proprii, amplitudinea oscilațiilor și energia transmisă mediului devenind infinite.

În realitate, ca urmare a amortizărilor din sistem, valorile acestor parametri se atenuază, motiv pentru care la proiectarea unui sistem ultrasonic trebuie să se țină cont de raportul dintre amplitudinea oscilațiilor transductorului (A_T) și valoarea ei admisibilă (A_{adm}) la frecvența de rezonanță:

$$K_{adm} = \frac{A_T}{A_{adm}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2 \cdot \Delta f_{adm} \cdot \frac{Q}{f_T}\right)^2}} \quad (1.27)$$

unde:

- Q este factorul de calitate al sistemului ultrasonic;
- Δf_{adm} reprezintă valoarea minimă a abaterii de la frecvența de rezonanță ce poate fi acceptată ținând cont de performanțele generatorului ultrasonic sau de comportarea sistemului la rezonanță (diferența $f'_2 - f'_1$);
- f_T este frecvența nominală de rezonanță a sistemului ultrasonic.

Contactul dintre concentrator și mediul de prelucrare se situează între contactul minim – care asigură transferul și localizarea energiei de procesare – și contactul maxim care, deși introduce o amortizare substanțială, diminuând amplitudinea de rezonanță și energia ultrasonică în zona de lucru, trebuie să permită funcționarea sistemului în limite acceptabile de eficiență. Factorii perturbatori care determină diminuarea amplitudinii de rezonanță sunt forma și dimensiunile concentratorului, masa sculei și forța axială de apăsare din proces.

Forța axială din proces influențează amplitudinea de rezonanță doar în cazul aplicațiilor în care procesarea mediului activat ultrasonic se face doar cu suprafața frontală a concentratorului.

1.3. Construcția sistemelor ultrasonice

În tehnică, există în momentul de față o mare varietate de echipamente menite să genereze ultrasunete. În funcție de energia primară pe care o utilizează în vederea creării de unde ultrasonice, aceste echipamente se clasifică în două mari categorii:

- Echipamente mecanice, care utilizează energie primară de natură mecanică;
- Echipamente electroacustice, care folosesc energia electrică pentru a produce vibrații mecanice de frecvență ultrasonică.

Principalele elemente care compun un ansamblu ultrasonic (generatorul ultrasonic - I, respectiv convertorul ultrasonic - II) sunt prezentate în figura 1.9. Convertorul ultrasonic este la rândul lui format din mai multe subansamble: un transductor ultrasonic 1, un concentrator adaptor de undă 5 (cunoscut în literatura de specialitate și sub numele de sonotrodă), elemente de fixare și izolare acustică 2 și nu în ultimul rând elemente de interconexiune 3 cu rolul de a garanta transferul energetic cu randament optim. Un alt element constituent al convertorului ultrasonic îl poate reprezenta amplificatorul intermediar de undă 4 (așa numitul booster), amplasat între transductor și concentrator.

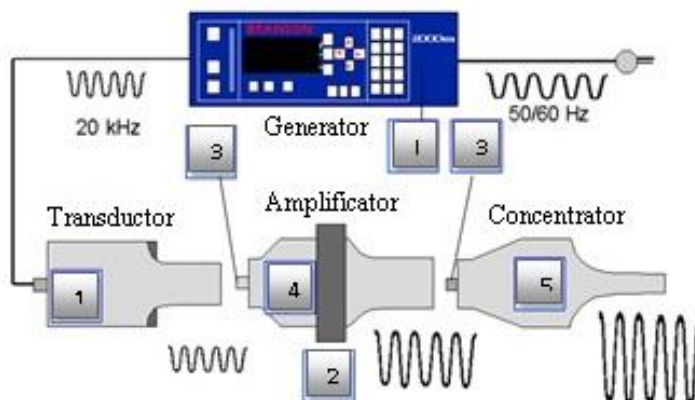


Fig.1.9. Principalele părți componente ale unui ansamblu ultrasonic [www.branson.com]

Cerințe care se impun sistemelor ultrasonice în vederea bunei lor funcționări

Construcția sistemelor ultrasonice depinde în mare măsură de specificul aplicațiilor pentru care au fost proiectate. Dată fiind diversitatea domeniilor de utilizare a ansamblurilor ultrasonice, acestea se prezintă în forme foarte variate. Cu toate acestea, există o serie de cerințe comune de natură tehnologică și acustică general valabile pentru sistemele ultrasonice indiferent de natura lor.

Cerințele tehnologice trebuie satisfăcute de către componenta finală a ansamblului ultrasonic, în speță concentratorul adaptor de undă. Acest set de cerințe este legat de precizia de calcul și proiectare a concentratorului, de rezistența lui la uzură și oboseală, de rigiditatea sistemului, de stabilitatea lui în timpul funcționării, de calitatea legăturii/legăturilor dintre concentrator și transductor, etc.

Cerințele acustice sunt condiționate de necesitatea de a crea în întreg sistemul ultrasonic un regim de oscilații care să permită transmiterea eficace a energiei ultrasonice către zona de lucru. Cele mai importante astfel de cerințe sunt: garantarea de pierderi minime de energie între transductor și concentrator, concentrarea maximului de energie ultrasonică posibilă în zona de lucru, determinarea exactă a regimului de rezonanță caracteristic pentru sistemul oscilator, adaptarea optimă între convertorul ultrasonic și generatorul de oscilații electrice, radiația uniformă a energiei ultrasonice de-a lungul întregii suprafațe de utilizare, eficacitate, sensibilitate și directivitate maxime ale sistemului, stabilitate în funcționare a sistemului oscilator, posibilitatea de a monitoriza și controla principalii parametri în orice moment al funcționării ansamblului, simplitate tehnologică și constructivă a elementelor componente ale sistemului ultrasonic, fiabilitate ridicată, etc.

Stabilitatea sistemului în timpul funcționării depinde de stabilitatea generatorului ultrasonic, de gradul de conservare al parametrilor de sistem și de variația rezistenței sarcinii.

1.4. Generatorul ultrasonic

Generatorul ultrasonic, prezentat sub diverse forme constructive în figura 1.10, reprezintă sursa primară de energie a ansamblului ultrasonic. Funcționarea generatoarelor ultrasonice se face pe baza a două principii:

- Principiul generării și amplificării unui semnal electric sinusoidal;
- Principiul comutației.

Generatorul ultrasonic are rolul de a transforma frecvența industrială a curentului alternativ furnizat de rețeaua de alimentare electrică, măsurând 50 Hz, în frecvență ultrasonică, având valori cuprinse în intervalul 16 – 40 kHz. Curentul de ieșire dintr-un generator ultrasonic este caracterizat de intensitate electrică ridicată și frecvență de oscilație stabilă.

Aceste generatoare furnizează energie electrică în banda de frecvență ultrasonică la parametri corespunzători excitării transductoarelor electro-ultrasonice cu scopul ca cele două elemente să intre în rezonanță [VOL 02].



Fig 1.10. Generatoare ultrasonice [www.ultrasuoni.fr; www.sonica-us.com; www.branson.com]

Generatoarele ultrasonice, în funcție de parametrii de ieșire ai semnalului electric, se clasifică în:

- Generatoare de frecvență variabilă;
- Generatoare de frecvență nominală fixă.

Generatoarele ultrasonice universale, de frecvență variabilă, se pot preta la o mare diversitate de transductoare, în funcție de natura și cerințele de utilizare ale aplicațiilor la care sunt întrebuițate. Ele permit controlul frecvenței de rezonanță a ansamblului ultrasonic într-un interval mare de valori, fapt ce le conferă o largă aplicabilitate tehnologică. Pe lângă frecvență, alți parametri care pot fi controlați și ajustați de către generatoarele ultrasonice universale sunt puterea, tensiunea și impedența.

În schimb, parametrii de ieșire ai generatoarelor ultrasonice specializate pentru diferite aplicații rămân întotdeauna invariabili, lucrând exclusiv la o frecvență

de rezonanță fixă și la putere constantă. Eficacitatea de funcționare a unui astfel de generator depinde de dispozitivul de conversie al frecvenței și de calitatea subansamblelor și a materialelor din care este construit. Influența cea mai mare asupra randamentului de funcționare al unui generator o are însă modalitatea în care este convertită energia electrică pe care a furnizat-o către transductorul ultrasonic. Pentru a compensa diferitele variații ale frecvenței de rezonanță ale sistemului și pentru a-l acorda la frecvența convertorului ultrasonic, generatoarele ultrasonice de frecvență nominală oferă posibilitatea de reglaj fin a frecvenței într-o gamă redusă de valori (aproximativ 1kHz).

Activarea ultrasonică a materialelor plastice se realizează cu generatoare de înaltă frecvență care produc energie electrică de frecvență situată în intervalul 20 – 40 kHz. Pentru aplicațiile unde este necesară furnizarea de către generator a unei frecvențe situate în afara intervalului mai sus amintit, se utilizează generatoare universale care acoperă o plajă mai largă de valori.

Generatoarele ultrasonice de înaltă frecvență prezintă câte un set de caracteristici electrice (frecvența, puterea la ieșire, randamentul de funcționare, stabilitatea și precizia de control a frecvențelor și capacitatea de a asigura stabilitatea amplitudinii oscilațiilor mecanice), respectiv non electrice (particularitățile constructive ale generatorului).

Parametri ca frecvența, intensitatea curentului și tensiunea electrică trebuie supravegheați în permanență, iar generatoarele trebuie să posede funcția de a-i ajusta automat în vederea funcționării în bune condiții a întregului ansamblu ultrasonic.

Generatoarele de înaltă frecvență furnizează energie electrică având o putere a cărei valoare se situează în gama de puteri nominale: 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 și 250 kW. Pentru activarea ultrasonică a materialelor plastice se utilizează de obicei valorile de la începutul șirului.

Convertorul ultrasonic

Elementele care compun convertorul ultrasonic sunt: transductorul ultrasonic, amplificatorul intermediar de undă (boosterul), concentratorul adaptor de undă (cunoscut și sub numele de sculă activă sau sonotrodă) și elementele de fixare și interconexiune.

Transductoarele ultrasonice transformă energia electrică de frecvență ultrasonică primită de la generatorul ultrasonic în energie mecanică de aceeași frecvență și o transmit spre scula de lucru.

Transductorul transformă energia electrică de înaltă frecvență în oscilații mecanice păstrând neschimbată valoarea frecvenței. Din cauza faptului că oscilațiile mecanice produse de transductor au o amplitudine scăzută (de la 0,5 până la 1,5 μm), se utilizează frecvent un amplificator intermediar de undă (booster) care se introduce în sistemul ultrasonic între transductor și elementul activ (concentratorul adaptor de undă). Un alt factor care contribuie la creșterea amplitudinii oscilațiilor mecanice îl reprezintă diferitele modificări de diametru ale secțiunilor transductorului, amplificatorului intermediar, dar mai ales a concentratorului. Aceste variații de diametru au ca rezultat creșterea amplitudinii de oscilație de până de 10 ori mai mult decât valorile înregistrate la ieșirea din transductor. Lungimea concentratorului este aleasă în așa fel încât valoarea maximă impusă a amplitudinii să fie atinsă în capătul ei activ.

1.5. Transductoarele ultrasonice

Transductoarele electromecanice sunt construite în vederea convertirii energiei electrice de înaltă frecvență în oscilații mecanice (vibrații) de frecvență ultrasonică.

Energia electrică se poate transforma în energie mecanică prin intermediul mai multor procese fizice bazate pe interacțiunea unui câmp electric sau magnetic cu diverse materiale. Transductoarele electromecanice sunt asociate cu forțele mecanice care produc sau sunt produse de către câmpurile electrice sau magnetice cu ajutorul unuia dintre efectele următoare: efectul piezoelectric electrostrictiv, efectul magnetostrictiv, efectul electrodinamic și efectul electromagnetic [AMZ 88].

Efectul piezoelectric se bazează pe emisia de încărcări electrice induse pe suprafața unui corp supus unei presiuni mecanice. Mărimea încărcării electrice este proporțională cu tensiunea mecanică aplicată, iar semnul ei se schimbă în funcție de natura deformării (dilatare, respectiv comprimare). Fenomenul se poate produce însă și în sens invers: dacă un corp cu proprietăți piezoelectrice este introdus într-un câmp electric, atunci el va fi supus unei deformări mecanice proporționale cu mărimea câmpului electric aplicat. În funcție de semnul câmpului electric aplicat (pozitiv sau negativ), materialul piezoelectric se poate comprima sau dilata. Fiecare material piezoelectric se caracterizează printr-un punct Curie care reprezintă temperatura până la care își păstrează intacte proprietățile piezoelectrice. Materialele cele mai eficiente și mai des utilizate în practică la fabricarea transductoarelor ultrasonice sunt ceramicele piezoelectrice.



Fig 1.11. Transductor piezoelectric [clangsonic.en.alibaba.com]

Efectul electrostrictiv constă în modificarea dimensiunilor unui corp ca urmare a introducerii lui într-un câmp electric, deformarea lui fiind direct proporțională cu puterile pare ale câmpului electric aplicat. Acest efect se produce ca urmare a interacțiunii dintre câmpul electric aplicat materialului și polarizarea netă indusă de acesta. Diferă de efectul piezoelectric prin faptul că produce o deformare mult mai mică și într-un singur sens.



Fig. 1.12. Transductor magnetostrictiv [construcție UPT]

Efectul magnetostrictiv direct (numit și efectul Joule) se manifestă în cazul materialelor feromagnetice și constă în deformarea lor mecanică la introducerea într-un câmp magnetic (figura 1.13). La fel ca și în cazul efectului piezoelectric, sensul deformării depinde de direcția câmpului magnetic aplicat. Materialele utilizate în construcția transductorilor magnetostrictivi (figura 1.12) se clasifică în trei categorii:

- materialele feromagnetice pure: nichelul (Ni), cobaltul (Co), fierul (Fe);
- aliajele: permendur (49% Co + 49% Fe + Va), alfer (86% Fe + Al), permalloy 45 (45% Ni + Fe), supermalloy (66% Ni + Fe);
- feritele – compuși de oxid feric (Fe_2O_3) cu $\text{NiO}_{1/2}$ sau $\text{ZnO}_{1/2}$

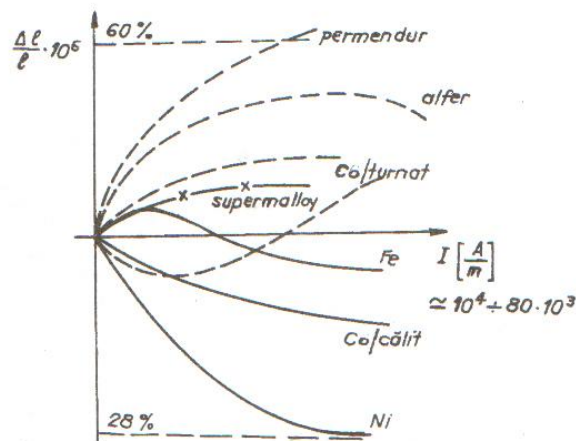


Fig. 1.13. Efectul Joule pentru diferite materiale magnetostrictive [KUT 91]

Toate materialele magnetostrictive sunt sensibile la temperatură, pierzându-și progresiv din proprietățile lor magnetice pe măsură ce temperatura crește (figura 1.14). Valoarea temperaturii la care ele își pierd definitiv aceste caracteristici poartă numele de punct „Curie”.

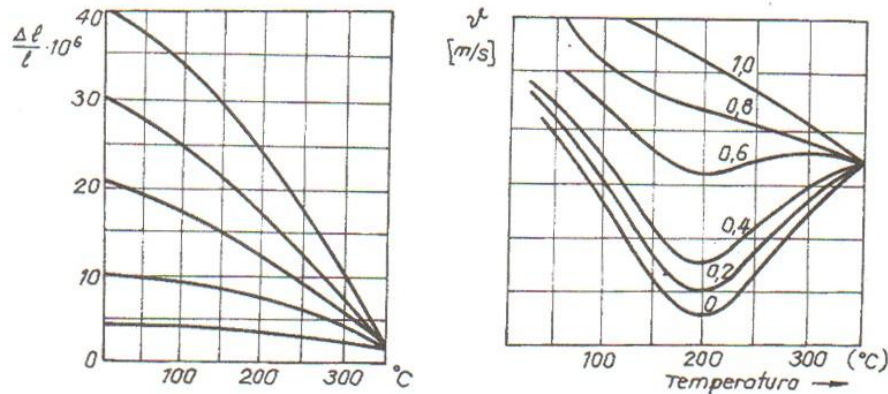


Fig.1.14. Influența temperaturii asupra proprietăților materialelor magnetostrictive [STA 03]

Transductoarele magnetostrictive pot suporta solicitări termice și mecanice mari fără a le fi afectată funcționalitatea, motiv pentru care se recomandă folosirea lor în cazul activării ultrasonice a unor medii lichide.

Datorită avantajelor pe care le prezintă, transductoarele cele mai utilizate sunt, în această ordine, cele piezoelectrice (figura 1.11), cele magnetostrictive, respectiv cele electrostrictive.

Construcția transductoarelor piezoelectrice se bazează pe efectul piezoelectric invers, iar eficacitatea lor este dată de factorul de cuplaj electromecanic k , respectiv factorul de conversie acustică η care se calculează cu ajutorul următoarelor formule matematice:

$$k = \sqrt{\frac{E_m}{E_p}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.28)$$

$$\eta = \frac{E_m}{E_p} = k^2 \text{ [%]} \quad (1.29)$$

în care:

E_m – energia mecanică produsă;

E_p – energia primită de la generatorul de semnal;

$E_p = \frac{1}{2} C \cdot U^2$ în cazul transductoarelor piezoelectrice;

și $E_p = \frac{1}{2} L \cdot I^2$ pentru transductoarele magnetostrictive.

unde:

C – este viteza de propagare a sunetului într-un anumit mediu;

U – tensiunea electrică aplicată;

L – inductanța câmpului electromagnetic;

I – intensitatea curentului electric aplicat.

De o importanță capitală în buna funcționare a transductoarelor este acordul care se realizează între parametrii de ieșire ai generatorului ultrasonic și parametrii de intrare în transductor (frecvența de rezonanță și impedanța acustică) în așa fel încât eficacitatea transformării electromecanice să fie maximă.

Temperatura maximă admisă pentru funcționarea unui transductor este de aproximativ 75°C. Pentru încărcări acustice slabe, care conduc la temperaturi superioare acestei valori, este imperios necesară concepția unui sistem de răcire a transductorului pe bază de aer.

Amplificatorul intermediar de undă (boosterul)

Amplificatorul intermediar de undă este un element opțional al ansamblului ultrasonic care se montează între transductor și concentrator. Rolul său este de a mări amplitudinea undelor ultrasonice recepționate de la transductor și de a le transmite în această formă la scula de lucru. Materialele din care sunt fabricate amplificatoarele de undă (oțel, titan, aliaje de aluminiu de înaltă rezistență) trebuie să se caracterizeze printr-o rezistență la uzură și oboseală foarte ridicate. Forma lor constructivă trebuie să asigure funcționarea în regim de rezonanță a întregului sistem ultrasonic, iar în zona lor nodală trebuie să asigure posibilitatea de fixare. Amplificatoarele intermediare de undă furnizează următoarele raporturi de amplificare a amplitudinii de oscilație: 1:2,5; 1:2; 1:1,5; 1:1; 1:0,6; 1:0,5; 1:0,4. Câteva exemple de amplificatori de undă, însoțite de factorul de mărire caracteristic fiecăruia, sunt prezentate în figura 1.15:



Fig. 1.15. Amplificatori intermediari de undă de diferiți factori de mărire
[www.ultrasonicwelding.org]

1.6. Concentratoarele adaptoare de undă (sonotrodele)

Concentratorul adaptor de undă, cunoscut în literatura străină de specialitate și sub denumirea de sonotrodă, reprezintă componenta finală a ansamblului ultrasonic, având funcția de a transmite energia ultrasonică spre mediul extern la parametri impuși de tehnolog. Concentratoarele, la fel ca și celelalte elemente ale convertorului ultrasonic, funcționează pe baza principiului frecvenței de rezonanță, fapt pentru care valoarea lungimii lor trebuie să reprezinte obligatoriu un multiplu întreg al semi-lungimii de undă:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}; \quad n \in N \quad (1.30)$$

Lungimea concentratorului trebuie aleasă în așa fel încât la capătul ei activ amplitudinea de oscilație a undelor mecanice să aibă valoarea maximă la frecvența de rezonanță de funcționare aleasă. Concentratorul reprezintă singurul element al ansamblului ultrasonic unic pentru fiecare procedeu tehnologic în parte, restul componentelor (generatorul, transductorul, amplificatorul, elementele de fixare și interconexiune) putând fi folosite la mai multe aplicații. Concentratoarele se produc într-o foarte mare varietate de forme și mărimi, în funcție de particularitățile aplicației la care servesc. Forma geometrică a unui concentrator influențează factorul de amplificare al amplitudinii oscilațiilor ultrasonice generate de restul ansamblului ultrasonic.

Concentratoarele adaptoare de undă îndeplinesc în cadrul unui sistem ultrasonic următoarele funcții:

- realizează transferul energiei ultrasonice de la, după caz, transductor sau amplificatorul intermediar de undă către locul unde se produce activarea ultrasonică;
- concentrează și focalizează energia ultrasonoră în zona de lucru;
- măresc la maxim randamentul activării ultrasonice a diferitelor procedee, inclusiv a celor de punere în formă a materialelor polimerice.

Modificarea unor parametri precum impedanța acustică a concentratorului sau viteza lui de oscilație se realizează prin modificarea diametrului secțiunii sale transversale. După forma în care sunt proiectate, concentratoarele se clasifică în două categorii:

- concentratoare primare, în principal cele de formă relativ simplă: cilindrice (cu unul sau mai multe diametre ale secțiunii), conice, exponențiale, catenoidale, ș.a.m.d.
- concentratoare contur, utilizate în special la sudarea diferitelor materiale.

În figura 1.16 sunt prezentate câteva forme constructive ale concentratoarelor:



Fig. 1.16. Concentratoare adaptoare de undă de diferite forme, mărimi și materiale
[www.fycg.com]

Materialele care se utilizează la fabricarea concentratoarelor trebuie să reprezinte o soluție de compromis între necesitățile acustice ale întregului ansamblu ultrasonic și particularitățile aplicației unde va fi implementată activarea cu ultrasunete. Se folosesc în general materiale care prezintă o slabă frecare internă, opunând astfel rezistență scăzută la transmiterea prin ele a vibrațiilor ultrasonice și amortizând o foarte mică parte din ele. Materialul cu cea mai largă aplicabilitate tehnologică este considerat a fi titanul grație excelentelor calități acustice de care face dovadă, a unei rezistențe mecanice ridicate și a unui coeficient de frecare internă foarte scăzut. Totuși, titanul prezintă și două dezavantaje: un preț de achiziție ridicat și o duritate mare ce-l face dificil de prelucrat. În afară de titan, se mai utilizează în egală măsură aliaje de-a sale precum Protasul 64 ($TiAl_6V_4$), oțeluri, oțeluri inoxidabile, materiale ceramice dure, aluminiul și aliaje ale sale ($AlCuMg_2$ și $AlCuMgPb$).

Aliajele de titan s-au arătat a fi capabile de a lucra la cele mai ridicate amplitudini ale oscilațiilor ultrasonice mulțumită rezistențelor mecanice foarte ridicate pe care le posedă. Datorită acestei caracteristici a lor au ajuns să fie considerate drept materiale standard în producerea concentratoarelor adaptoare de undă.

În cazul unor aplicații speciale, concentratoarele se pot fabrica de asemenea din oțel inoxidabil, sticlă sau anumite materiale ceramice, însă amplitudinea maximă de oscilație a undelor ultrasonice în cazul acestor materiale este net inferioară celei întâlnite la concentratoarele din aliaje de titan.

Dimensiunile exacte ale concentratoarelor primare se obțin cu ajutorul unor relații matematice rezultate din derivarea ecuației diferențiale a lui Webster, ecuație care caracterizează propagarea undelor longitudinale prin corpuri de diferite secțiuni. O altă modalitate de proiectare a concentratoarelor o reprezintă dimensionarea asistată de calculator. Ambele metode trebuie urmate neapărat de o verificare amănunțită realizată cu aparatură specifică de laborator.

Calculul dimensiunilor concentratoarelor adaptoare de undă se poate realiza pe baza teoriei propagării undelor elastice prin secțiuni variabile în cazul vibrațiilor neadaptate [LUC 07].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial \phi \partial (\ln S_x)}{\partial x \partial x} - c^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0 \quad (1.31)$$

unde

- ϕ este potențialul vitezei;
- S_x este aria suprafeței barei la distanța x de origine;
- c este viteza de propagare a undelor acustice prin material.

În cazul unei bare cu secțiunea longitudinală de formă exponențială (cazul cel mai des întâlnit în practică), aria secțiunii barei la distanța x de origine va fi [AMZ 06]:

$$S_x = S_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1.32)$$

unde α este un coeficient care caracterizează variația secțiunii exponențiale.

Ecuatia (1.31) devine astfel:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \alpha \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (1.33)$$

Soluția ecuației (1.33) este de forma:

$$\phi(t, x) = C e^{j(\omega t + \gamma x)} \quad (1.34)$$

unde C este o substanță.

Înlocuind ϕ și derivatele acesteia se va obține soluția generală a ecuației (1.33) [LUC 07]:

$$\phi(t, x) = e^{\frac{\alpha}{2}x} \left(A e^{-jx \sqrt{k^2 - \frac{\alpha^2}{4}}} + B e^{-jx \sqrt{k^2 - \frac{\alpha^2}{4}}} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (1.35)$$

unde $k = \omega/c$.

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

Din relația (1.35) se constată existența în bară a două unde: o undă progresivă, care se propagă de la bază spre vârf și o undă regresivă care se propagă în sens invers.

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

$$p_x = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = -j\rho\omega e^{\frac{\alpha}{2}x} \left(A e^{-j\frac{\omega}{c}x} + B e^{-j\frac{\omega}{c}x} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (1.36)$$

Expresia vitezei particulei v_x se determină cu formula:

$$v_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = e^{\frac{\alpha}{2}x} \left[A \left(\frac{\alpha}{2} - j\frac{\omega}{c} \right) e^{-j\frac{\omega}{c}x} + B \left(\frac{\alpha}{2} - j\frac{\omega}{c} \right) e^{-j\frac{\omega}{c}x} \right] \quad (1.37)$$

în care:

- $c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\alpha^2 c^2}{4\omega^2}}}$;
- ρ este densitatea materialului din care este confecționată bara.

Pentru a proiecta concentratoarele adaptoare de undă este necesar să cunoaștem viteza particulei la secțiunea inițială S_0 și la cea finală S_f . Se pun condițiile:

$$x = 0 \Rightarrow v_0 = \left[A \left(\frac{\alpha}{2} - j\frac{\omega}{c} \right) + B \left(\frac{\alpha}{2} + j\frac{\omega}{c} \right) \right] e^{j\omega t} \quad (1.38)$$

$$x = L \Rightarrow v_L = e^{\frac{\alpha}{2}L} \left[A \left(\frac{\alpha}{2} - j \frac{\omega}{c} \right) + B \left(\frac{\alpha}{2} + j \frac{\omega}{c} \right) e^{-j \frac{\omega}{c} x} \right] e^{j \omega t} \quad (1.39)$$

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

$$N = \frac{v_L}{v_0} = (-1)^n \cdot e^{\frac{\alpha}{2}L} = \sqrt{\frac{S_0}{S_f}} \quad (1.40)$$

Dacă se cunoaște valoarea lui N se poate determina coeficientul de variație al secțiunii cu relația:

$$\alpha = \frac{2 \ln N}{L} \quad (1.41)$$

Valoarea lungimii L este supusă unor modificări determinate de modul de variație al secțiunii. Combinând relațiile (1.39) cu (1.40) și (1.41) se poate determina lungimea concentratorului cu următoarea expresie:

$$L = \frac{nc}{2f_c} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{n\pi} \right)^2} \quad (1.42)$$

în care:

- f_c [Hz] este frecvența de calcul;
- c [cm/s] este viteza de propagare a undelor longitudinale în materialul din care este confecționată bara;
- n reprezintă un număr întreg.

Un alt parametru important în proiectarea concentratoarelor îl reprezintă poziționarea planelor nodale, necesar pentru fixarea sistemului ultrasonic. Pentru a-l determina se impune condiția ca $v_x = 0$, relația (1.37) devenind:

$$(A + B) \left[\frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\omega}{c} x\right) - \frac{\omega}{c} \sin\left(\frac{\omega}{c} x\right) \right] = 0 \quad (1.43)$$

De aici rezultă:

$$x_{nodal} = \frac{c'}{\omega} \arctg\left(\frac{1}{n\pi} \ln N + n' \pi\right) \quad (1.44)$$

unde:

- n' este un număr întreg;
- $n' = 0$ pentru primul nod;
- $n' = 1$ pentru al doilea nod;
- ș.a.m.d.

Pe lângă componentele sale de bază prezentate anterior, ansamblul ultrasonic mai cuprinde și alte elemente auxiliare cum ar fi:

Elemente de fixare mecanică și izolare acustică

Elementele de fixare și izolare acustică fac legătura dintre ansamblul ultrasonic și structura de rezistență a echipamentului (mașina de injectat în cazul activării ultrasonice a injectării materialelor plastice), în așa fel încât să izoleze acustic cele două entități.

Aceste elemente permit transmiterea energiei ultrasonore în zona de lucru cu randament maxim, împiedicând disiparea ei de-a lungul sistemului ultrasonic. Din rațiuni energetice (eliminarea pierderilor) și de stabilitate dinamică, prinderea sistemului ultrasonic de echipamentul de injectat se realizează exclusiv în zonele sale nodale.

Cuplajele mecanice

Cuplajele mecanice realizează o legătură mecanică și acustică puternică între suprafețele de separație a două componente ale ansamblului ultrasonic (transductor și concentrator adaptor de undă) care intră în contact. Rolul acestor elemente de cuplaj este de a asigura transmiterea fără pierderi majore a energiei ultrasonice între cele două componente menționate.

1.7. Efectele posibile generate de acțiunea ultrasunetelor asupra materialelor polimerice topite în stare de curgere

În cazul activării ultrasonice a injectării materialelor plastice a fost identificată apariția unei serii de efecte [BĂD 67, BEY 69, DRĂ 83, KUT 91, ROZ 71]:

1.7.1. Efectul de suprafață (reducere a frecării)

În timpul activării ultrasonice, pentru intervale foarte scurte de timp dintr-un ciclu de oscilație, viteza melcului de injectat depășește viteza de deplasare a materialului polimeric. La suprafața de separație dintre concentrator și topitură, vibrația ultrasonică a concentratorului determină o deplasare infimezimală a topiturii la o distanță de ordinul micronilor, suficientă pentru a se realiza desprinderea materialului de pe concentrator (figura 1.17).

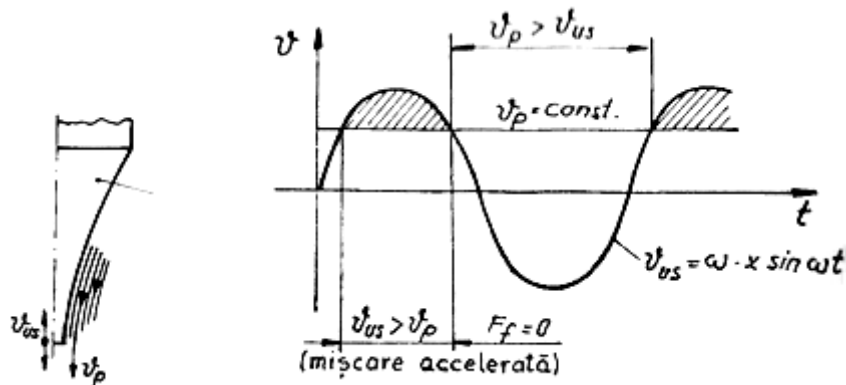


Fig. 1.17. Efectul de reducere a frecării [STA 03]

Datorită schimbării sensului vectorului forței de frecare și scăderii coeficientului de frecare μ corespunzător interfeței de contact dintre suprafața laterală a concentratorului și topitură, se ajunge la anularea forței ce se opune mișcării în această regiune. Astfel, se constată o reducere sau chiar anulare temporară a forței de reținere a topiturii, rezultând o creștere a debitului și determinând modificarea distribuției vitezei de curgere a topiturii, de la o curgere de tip canal cilindric cu secțiune inelară (figura 1.18a) la o curgere de tip canal cilindric cu secțiune inelară cu partea centrală în mișcare (figura 1.18b). Drept consecință, se înregistrează o creștere a vitezei medii de deplasare a topiturii, reducându-se astfel vâscozitatea aparentă, sporindu-se debitul de tranzit fără un aport suplimentar de energie termică [STA 03].

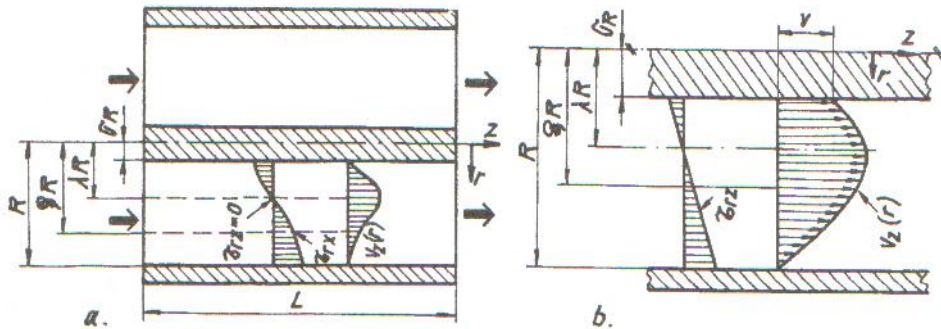


Fig. 1.18. Secțiune de curgere inelară [STA 03]

1.7.2. Înmuiera acustică

Propagarea undelor ultrasonice în materiale metalice generează tensiuni acustice și deformații elasto-plastice ce determină dezancorarea dizlocațiilor și deplasarea lor în structuri cristaline. Energia ultrasonică este absorbită cu predilecție de material în zonele cu imperfecțiuni ale volumului activat (teorie dezvoltată de Langenecker [DRA 83, ROZ 73]), generând aceleași efecte precum energia termică (reducerea tensiunii statice de deformare).

În cazul topiturilor polimerice, în vecinătatea punctului de injectare se pot regăsi zone de material unde nu a avut loc o topire completă (temperatura topirii polimerice este superioară celei de vitrifiere, dar inferioară celei de curgere). Acest fenomen se explică prin prezența unor germeni de cristalizare sau cristale de dimensiuni mici înconjurate de material topit amorf (figura 1.19).

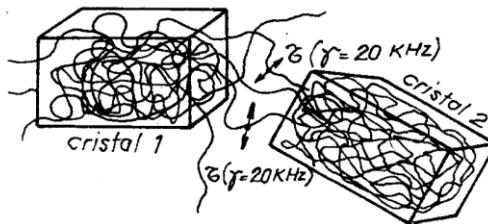


Fig. 1.19. Reducerea vâscozității datorită tensiunilor tangențiale induse [STA 03]

Dacă în cazul materialelor metalice are loc deblocarea dizlocațiilor ca urmare a tensiunilor tangențiale induse de către energia ultrasonică, la un polimer semicristalin bifazic energia ultrasonică se convertește în energie termică, generând o creștere a temperaturii materialului amorf intercristalin. Această creștere de temperatură determină o mobilitate mai ridicată a lanțurilor macromoleculare de material amorf prin relaxarea acestora și reducerea vâscozității aparente ca urmare a tensiunilor tangențiale induse.

În unele cazuri extreme, ținând cont de natura și structura materialului polimeric, este posibilă ruperea macromoleculi din cauza solicitării ciclice la care a fost supusă și fragmentarea pe anumite segmente a lanțului polimeric. Consecința

este reducerea masei moleculare a polimerului și implicit proprietăți mai bune de curgere.

În concluzie, activarea ultrasonică a materialului polimeric produce diminuarea semnificativă a tensiunii superficiale la limita de separare a fazelor solid-lichid, polimerul suferind modificări comportamentale și de structură datorate ruperii lanțurilor moleculare [STA 03].

1.7.3. Absorbția energiei undei și transformarea ei în energie termică

Volumul unei topituri de polimer activat ultrasonic este compus dintr-o multitudine de macromolecule care se întrepătrund și între care apar constrângeri legate de mobilitatea lor, determinând comportamentul vâscos al materialului. Ca urmare a acestui fapt, amortizarea amplitudinii de oscilație a undelor ultrasonice induse în material este provocată de frecările interne și de conductivitatea termică din mediul de propagare.

Stokes a definit coeficientul de absorbție al undelor ultrasonice în mediul de propagare în funcție de vâscozitatea lui ca fiind:

$$\alpha' = \frac{2 \cdot \eta \cdot \omega^2}{3 \cdot \rho \cdot C_L^3} = \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta}{3 \cdot \rho \cdot C_L^3} \quad (1.31)$$

Conductivitatea termică a mediului în care se propagă unda influențează de asemenea și felul în care are loc absorbția energiei ultrasonice. Teoria lui Kirchhoff menționează schimbul de căldură ce are loc între porțiunile de compresie din undă și cele de destindere, fapt ce duce la micșorarea treptată a amplitudinii de oscilație. Coeficientul de absorbție în mediul de propagare este definit în acest caz ca un raport între energia absorbită și cea incidentă:

$$\alpha'' = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot f^2}{\rho \cdot C_L^3} \cdot \frac{\chi - 1}{c_p} \cdot k_t \quad (1.32)$$

Teoria Stokes-Kirchhoff definește un coeficient total de absorbție al undelor ultrasonice ca sumă dintre cei doi coeficienți specificați anterior.

$$\alpha = \alpha' + \alpha'' = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot f^2}{\rho \cdot C_L^3} \cdot \left(\frac{3}{4} \eta + \frac{\chi - 1}{c_p} \cdot k_t \right) \quad (1.33)$$

unde: η – coeficient de vâscozitate;

ρ – densitatea mediului;

k_t – coeficient de conductivitate termică (dependent de material);

$\chi = c_p/c_v$ – raportul căldurilor specifice la presiune, respectiv volum constant.

Căldura preluată prin absorbție de către mediul de propagare determină creșteri de temperatură în zonele sale de discontinuitate. Acest fenomen a stat la baza dezvoltării unor tehnologii de asamblare prin activare ultrasonică a pieselor din materiale plastice.

1.7.4. Efectul ultrasonic termo-pelicular

Efectele activării ultrasonice a unor medii polimerice vâscoase sunt efectul de suprafață și efectul termic (conversia energiei ultrasonice în energie termică în zonele de discontinuitate ale mediului parcurs de undele ultrasonice). În aplicațiile industriale clasice, efectul termic se exploatează la nivelul suprafeței frontale a unui concentrator care exercită o presiune asupra mediului de activare. Acest efect se pune în lumină prin plasarea unor termocuple care să măsoare temperatura materialului polimeric în imediata apropiere a concentratorului.

Activarea ultrasonică determină la nivelul suprafeței laterale de contact a concentratorului cu topitura formarea unui strat subțire de material polimeric supraîncălzit, de o vâscozitate mult redusă în raport cu vâscozitatea medie a întregului volum de material. Acest strat de material cu proprietăți lubrifiante foarte bune favorizează curgerea materialului plastic prin orificiul de injecție.

Efectul de suprafață se manifestă în exact aceeași zonă ca și cel termic, la suprafața laterală de contact dintre concentrator și fluidul polimeric sub o presiune cuprinsă între 600-1200 bari. El favorizează desprinderea materialului plastic de pe suprafața concentratorului, determinând creșterea și menținerea debitului la valori superioare celei inițiale, evitându-se astfel apariția unor defecte la piesele rezultate.

Cele două efecte (cel de suprafață și cel termic) se suprapun și sunt inseparabile, motiv pentru care acțiunea lor comună a fost denumită efect ultrasonic termo-pelicular.

Grosimea stratului de material polimeric a cărui proprietăți reologice au fost modificate depinde de proprietățile fluidului, în principal de capacitatea lui de a atenua oscilațiile undelor ultrasonice propagate în el (α din relația (1.33)).

Creșterile locale de temperatură în volumul de material conferă două avantaje importante activării ultrasonice [STA 03]:

- Reducerea consumului energetic al elementelor de încălzire ale duzei, în unele cazuri ajungându-se chiar la eliminarea completă a lor;
- Obținerea aceluiași debit în cazul activării ultrasonice a extrudării pentru temperaturi ale topiturii polimerice inferioare celor înregistrate în cazul clasic de extrudare.

Pentru ca acest efect cumulat să aibă loc trebuie îndeplinite câteva cerințe de lucru specifice:

- Presiunea topiturii polimerice să aibă valori ridicate;
- Materialul plastic supus activării ultrasonice trebuie în prealabil să fie degazat și uscat;
- Durata de activare trebuie să fie relativ scurtă (de ordinul secundelor).

În cazul activării ultrasonice a proceselor de sudare, injecție, extrudare sau formare prin presare a materialelor polimerice este foarte puțin probabilă manifestarea următoarelor efecte ale acțiunii ultrasunetelor valabile în cazul altor aplicații ale lor: cavitația, polimerizarea, depolimerizarea și dispersia ultrasonică [AMZ 98, BĂD 67, DRĂ 83, KUT 91, ROZ 71].

Cavitația presupune o tranziție de fază de la starea lichidă la cea gazoasă, urmată de implozia acestor bule de aer, având ca efect generarea unei unde de șoc. În cazul materialelor polimerice, cavitația poate apărea datorită prezenței unor cantități infime de apă în masa anumitor polimeri higroscopici.

În cazul procedeelor de punere în formă a materialelor polimerice, conținutul de apă al topiturii este infim datorită faptului că granulele de material se usucă în prealabil în cuptor electric timp de 4 – 8 ore. De asemenea, presiunea materialului plastifiat este mare (50 – 1500 de bari).

Ținând seama de mecanismul de dezvoltare al bulei de cavitație și de condițiile în care se realizează procesarea topiturii polimerice, putem concluziona că producerea nucleelor și a bulelor de cavitație este imposibilă.

Polimerizarea este un fenomen ce apare ca urmare a prezenței radicalilor liberi în soluțiile de polimeri în care se găsesc urme de apă. Cavitația acustică determină disocierea moleculei de apă creând radicali liberi care amorsează polimerizarea.

Efectul de polimerizare necesită timpi de expunere de ordinul zecilor de minute, în timp ce activarea ultrasonică a unui volum de material topit la trecerea lui prin duza de injectare este de ordinul a câteva secunde, insuficiente pentru a se forma radicalii liberi.

Depolimerizarea reprezintă fenomenul prin care are loc scindarea legăturilor de valență în structura unor polimeri. Activarea ultrasonică pentru un timp îndelungat a soluțiilor de nitroceluloză, acetat de polivinil sau polistiren provoacă importante modificări în structura materialelor polimerice. S-au constatat reduceri ireversibile de vâscozitate, materialul activat nemairevenind la vâscozitatea inițială nici în urma evaporării solventului și nici printr-o nouă dizolvare. Restabilirea legăturilor de valență nu se poate realiza decât în condiții speciale și numai în prezența unor catalizatori corespunzători.

Cavitația acustică formată într-un lichid complet degazat sau sub presiune împiedică sau diminuează procesul de depolimerizare.

Dispersia ultrasonică este un fenomen care se dezvoltă la suprafața de separație dintre un mediu gazos și unul lichid, aceasta neputându-se manifesta în cazul activării ultrasonice a procedurilor de punere în formă a materialelor plastice.

Activarea ultrasonică realizată în vecinătatea orificiului de injectare sau extrudare se poate realiza printr-o concentrare de energie ultrasonică în zona respectivă. Materialul polimeric beneficiază astfel de efectele specifice activării ultrasonice, efecte care pot folosi la:

- Corectarea unor neajunsuri funcționale ale dispozitivelor de injectat respectiv extrudat;
- Controlul temperaturii în zona de lucru a concentratorului, prin reglarea cantității de energie ultrasonică introdusă în sistem;
- Modificarea parametrilor caracteristici interfeței de contact dintre concentrator și topitură prin evitarea apariției curgerii turbulente și prin majorarea vitezei de curgere.

Având ca punct de plecare activarea ultrasonică a materialelor polimerice și efectele generate de aceasta (efectul de suprafață, înmuierea acustică, transformarea energiei ultrasonice în energie termică și efectul ultrasonic termopelicular) s-au dezvoltat o serie de procedee neconvenționale de punere în formă a materialelor plastice.

1.8. Aplicații ale activării ultrasonice la procedeele de punere în formă a materialelor polimerice (extrudare și injectare)

1.8.1. Matrițe pentru injectarea materialelor polimerice activată ultrasonic

Una dintre cele mai evoluate variante constructive de matrițe de injectare este cea cu canale calde, unde pierderile de căldură din canalele de distribuție, duză și matriță sunt compensate prin prezența unor rezistențe încălzitoare. În acest fel, temperatura materialului polimeric este în permanență menținută la parametri optimi, făcându-l ușor de procesat. Încălzirea duzelor de injectare se poate face atât prin elemente interioare, cât și exterioare. În cazul activării ultrasonice a procesului de injectare, concentratorul adaptor de undă este poziționat în imediata vecinătate a orificiului de injectare, având, pe lângă roul său principal de concentrare a energiei ultrasonice, și funcția de a încălzi materialul polimeric, făcând inutilă prezența unui sistem distinct de încălzire a duzei. Astfel, se realizează economii energetice semnificative. Creșterea temperaturii topiturii este însoțită de o reducere a forțelor de frecare la suprafața de separație dintre concentrator și materialul polimeric aflat în curgere, rezultând o ameliorare semnificativă a proprietăților de injectare a materialului.

O astfel de matriță de injectare cu canale calde activată ultrasonic e prezentată în figura 1.20 [STA 03].

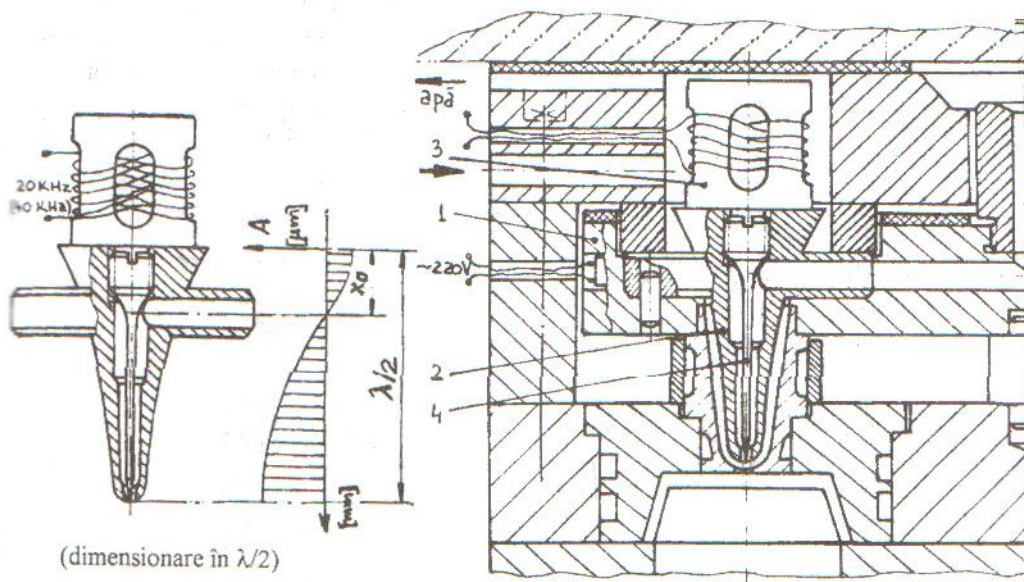


Fig.1.20. Ansamblu ultrasonic pentru activarea curgerii topiturii polimerice în matrița de injectare cu canale calde și distribuția amplitudinii oscilațiilor ultrasonice [STA 03]

Distribuitoarea centrală (1) este adaptată de așa natură încât să încorporeze un concentrator adaptor de undă (2), al cărui capăt activ este armonizat geometric cu duza de injectare. De celălalt capăt al concentratorului este montat transductorul magnetostrictiv sau piezoelectric (3) conectat la generatorul de ultrasunete. Răcirea transductorului se realizează după caz cu apă (în cazul transductoarelor

magnetostrictive) sau aer (în cazul transductoarelor piezoelectrice) prin intermediul unor canale executate în corpul matriței. În interiorul concentratorului, în canalul central de injectare se găsește acul (4), al cărui capăt stabilește interstițiul de injectare adecvat. Concentrarea maximă de energie ultrasonică are loc în apropierea vârfului acului, capătului activ al sonotrodei și orificiului de injectare, cu efecte benefice pentru procesul de injectare.

Printre avantajele acestei soluții constructive putem aminti:

- Consum de energie considerabil redus datorat efectelor de volum și suprafață;
- Elimină necesitatea încălzirii cu rezistențe electrice a duzei de injectare, diferența de temperatură fiind compensată prin efectul termic al activării ultrasonice;
- Conferă posibilitatea reglării fine a cantității de energie ultrasonică introdusă în sistem, rezultând un control facil al comportamentului reologic al topiturii și implicit al procesului de injectare.

1.8.2. Extrudarea materialelor termoplastice activate ultrasonic

Activarea ultrasonică a procesului de extrudare se bazează pe construcția unui cap de extrudare reglabil prezentat în figura 1.21 și utilizat la extrudarea profilată și la procedeele de extrudare-sulfare.

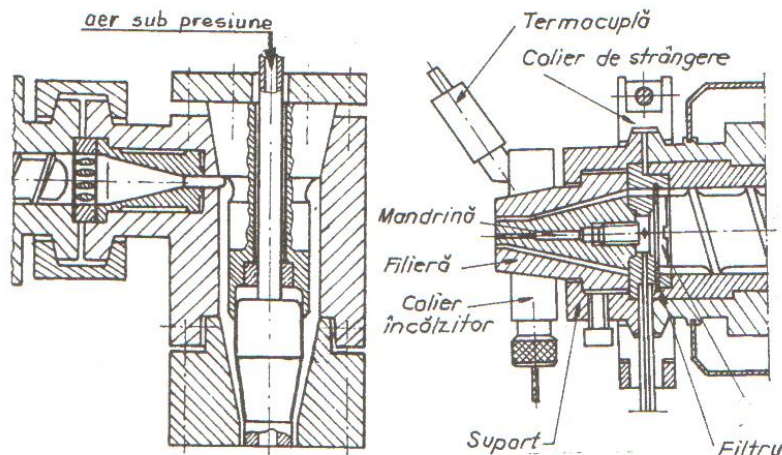


Fig.1.21. Filieră de extrudare [STA03]
a) extrudare-suflare b) extrudare profilată

Interstițiul de curgere a materialului extrudat se poate modifica prin reglajul axial al componentei centrale prezente în construcția capului de extrudare. În timpul extrudării această componentă rămâne fixă și poate fi prevăzută cu un element interior de încălzire destinat compensării pierderilor termice și menținerii la un nivel constant a temperaturii topiturii polimerice.

Pentru a reduce frecarea la perete a topiturii polimerice s-au folosit materiale fluorurate care se depun pe suprafețele duzei de extrudare fie sub formă de film, fie ca aditivi în materialul extrudat. Drept consecință, s-au înregistrat creșteri ale debitului maxim admisibil rezultând o îmbunătățire importantă a calității suprafețelor produselor extrudate. Dezavantajul utilizării acestei soluții îl reprezintă

costul ridicat al materialelor fluorurate, riscând transformarea procedului într-unul contraproductiv.

Activarea ultrasonică a extrudării materialelor termoplastice se produce prin înlocuirea elementului central al capului de extrudare cu un concentrator adaptor de undă proiectat în conformitate cu construcția mașinii de extrudat. Acest concentrator permite generarea efectului ultrasonic termopelicular specific activării ultrasonice a unui mediu vâsco-elastic sub presiune.

Efectul ultrasonic termo-pelicular se manifestă prin reducerea forțelor de frecare la suprafața de separație concentrator-material plastic și prin creșterea locală a temperaturii topiturii polimerice, facilitându-se astfel fluidizarea curgerii. Drept urmare se îmbunătățesc proprietățile reologice ale materialului supus extrudării, fapt care determină ameliorarea procedului în sine.

Soluția constructivă pentru capul de extrudare folosit la extrudarea termoplastice activată ultrasonic este prezentată în figura 1.22 [ICL 03, ICL 05, ICL 08].

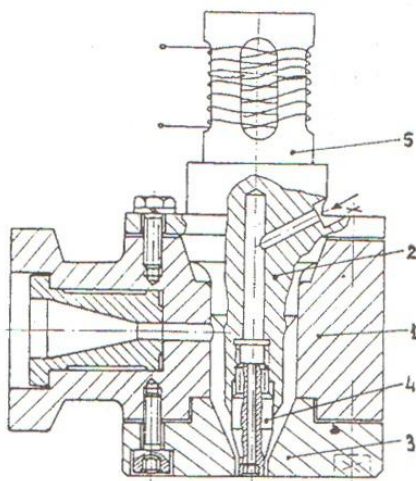


Fig. 1.22. Soluție constructivă pentru activarea ultrasonică a extrudării materialelor termoplastice [ICL 03, ICL 05, ICL 08]

Corpul dispozitivului de extrudare (1) este adaptat de așa natură încât să permită încorporarea unui concentrator adaptor de undă (2) proiectat în conformitate cu cerințele procedului de extrudare. Concentratorul este prevăzut cu o flanșă care să înlesnească prinderea sa în zona sa nodală în corpul extruderului. De asemenea, în proiectarea concentratorului s-a ținut seama și de forma și dimensiunile duzei (plăcii) de extrudare (3). În capătul activ al concentratorului se găsește un vârf interschimbabil prin înșurubare, vârf care stabilește interstițiul de extrudare. La capătul opus al concentratorului se află un transductor magnetostrictiv (5), răcit în permanență cu apă și conectat la generatorul de ultrasunete.

Avantajele acestui dispozitiv de extrudare activată ultrasonic sunt:

- Producerea unei puternice concentrări de energie ultrasonică în timpul activării la capătul activ al concentratorului; energia ultrasonică se transformă în energie termică, generând un efect termic materializat prin creșterea temperaturii în zona de acțiune a concentratorului determinând fluidizarea curgerii topiturii;

40 Cercetări teoretice cu privire la activarea ultrasonică a curgerii polimerilor - 1

- Reducerea forțelor de frecare și ameliorarea proprietăților de curgere a topiturii polimerice la nivelul suprafeței de contact a concentratorului cu materialul plastifiat; toate acestea se datorează efectului de suprafață indus de activarea ultrasonică a topiturii sub presiune;
- Eliminarea dezavantajelor create de o distribuție neuniformă a temperaturii în secțiunea de ieșire a materialului extrudat prin controlul intensității efectului termo-acustic; acest fapt se realizează prin reglarea cantității de energie ultrasonică introdusă în sistem;
- Majorarea semnificativă a debitului maxim la extrudare prin eliminarea defectelor specifice procedului de extrudare a termoplasticeilor;
- Posibilitatea de reglaj permanent al parametrilor de extrudare prin modificarea nivelului activării ultrasonice.

2. OBIECTIVELE CERCETĂRII TEZEI

Stabilirea obiectivelor cercetării doctorale s-a făcut ținându-se cont de contextul în care s-au realizat studiile și cercetările privind utilizarea energiei ultrasonice în activarea proceselor de curgere a polimerilor topiți realizate pe plan mondial în ultimii 15 ani. Aceste studii au evidențiat materializarea așa zisului "*efect ultrasonic termopelicular*" [STA 99], în unele cazuri prin efecte tehnologice cu potențial economic de nivel ridicat, în alte cazuri de nivel nesemnificativ în raport cu "investiția" legată de introducerea energiei ultrasonice în proces.

Consacrarea pe plan industrial a unor tehnologii de injectare sau extrudare activate ultrasonic este încetinită de diferențele constructiv-funcționale ce impun ca pentru fiecare aplicație în parte modul de adaptare a sistemului ultrasonic la proces să fie diferit și mai ales foarte particular. Acest aspect este subliniat de modul de funcționare în "regim de rezonanță" a structurilor activate precum și de posibilul efect perturbator al acestui regim determinat de unul sau mai mulți parametri de proces.

Pe de altă parte sunt tot mai tentante unele aplicații ale căror limite actuale par a putea fi depășite tocmai datorită unor activari ultrasonice a proceselor (injectare piese cu pereți subțiri, microinjectare). Acest ultim aspect a determinat și orientarea cercetărilor prezentei teze având în vedere potențialul aplicativ considerabil pe care activarea ultrasonică l-ar putea avea în anumite aplicații. Pentru confirmarea acestei prezumții științifice sunt necesare studii și experimente folosindu-se un echipament de cercetare adecvat, corespunzător cu particularitățile activării ultrasonice optime a proceselor în cauză.

Luând în considerare sinteza și analiza realizărilor anterioare pe care ne bazăm, putem evoca rezumativ următoarele:

- Studii doctorale desfășurate în perioada 1996-2000 la Universitatea „Politehnica” din Timișoara care pun în evidență și explică pentru prima dată în mod coerent un posibil efect ultrasonic termopelicular (Teza de doctorat cu titlul „Studiul activării ultrasonice a proceselor de injectare și extrudare a materialelor termoplastice” [STA 99])
- Programul de cercetare și dezvoltare ULTRA-MELT [www.ultramelt.org], desfășurat în perioada 2003-2006 și finanțat de Comunitatea Europeană, asupra aplicării energiei ultrasonice în procedeele de injectare și extrudare, program realizat sub tutela mai multor asociații patronale și unități de producție și cercetare.
- Literatura de specialitate de dată relativ recentă (2000-2007) consacră o serie de realizări în ceea ce privește construcția matrițelor de injectare activate ultrasonic, cele mai reprezentative dintre acestea fiind redată într-o serie de brevete de invenție și soluții practice rezultate din acestea.
- Cercetarea teoretică și experimentală a efectelor activării cu ultrasunete (creștere de debit și ameliorare a defectelor) în procesele de injectare a materialelor polimerice folosind echipamente de tip industrial (ansamblu convertor ultrasonic+mașină de injectat+matriță), efectuată în perioada 2007-2010 la Universitatea „Politehnica” din Timișoara, în cadrul unei teze de doctorat cu titlul „Cercetări teoretice și experimentale privind activarea cu ultrasunete a proceselor de curgere a materialelor polimerice” [SÎR 09].

Temele marcate mai sus definesc un ansamblu de rezultate ce pot fi acceptate ca fiind suficient de elocvente privind efectele activării ultrasonice în procesele ce comportă curgerea polimerilor topiți și anume:

- Încălzirea și fluidizarea zonală în spațiile adiacente sculei de activare;
- Reducerea substanțială a frecărilor în straturile vecine zonei activate și pe peretele sculei de activare;
- Dispersia efectului tehnologic favorizant procesului între limite foarte largi, de la foarte semnificativ la nesemnificativ, datorită în principal modului specific în care se poate face adaptarea sistemului ultrasonic rezonant la structura constructiv-funcțională a echipamentului de proces (mașini, matrițe, capete de extrudare, concentratoare adaptoare de undă).
- Necesitatea realizării unor studii și cercetări suplimentare și complementare celor efectuate până în prezent pentru a identifica cu mai mare acuratețe aplicațiile interesante sau de perspectivă pentru a fi activate ultrasonic.

În cele ce urmează se prezintă rezumativ cercetările amintite care constituie o bază de date referențiale suficient de reprezentativă pentru a putea identifica și justifica obiectivul cercetărilor abordate în această teză.

2.1. Studiul activării ultrasonice a curgerii polimerilor și sinteza rezultatelor experimentale privind efectul termopelicular (extras rezumativ - Teză de doctorat „Studiul activării ultrasonice a proceselor de injectare și extrudare a materialelor termoplastice” [STA 99])

Ultrasunetele de frecvențe joase (20-100 kHz) și puteri mari (100-3000 W), denumite adesea și macrosunete, sunt utilizate în numeroase aplicații datorită efectelor pe care le au asupra materialelor în timpul procesării acestora. Pe baza unor ipoteze de similitudine și a rezultatelor experimentale privind *efectul de volum* (reducerea semnificativă a tensiunii statice necesare deformării plastice a metalului pe măsura creșterii densității de energie acustică) și *efectul de suprafață* (reducerea coeficientului de frecare) manifestate în procesele de deformare plastică a metalelor, s-au realizat studii preliminare și încercări de laborator privind posibilitatea activării proceselor de curgere a materialelor polimerice în stare topită.

Efectul ultrasonic termopelicular a fost identificat în cazul aplicării energiei ultrasonice de frecvențe joase asupra polimerilor topiți în stare de curgere și se manifestă prin:

- o încălzire locală a polimerului care permite creșterea sensibilă a temperaturii și a vitezei de curgere în porțiunile finale ale traseului de curgere;
- diminuarea progresivă a frecării dintre polimerul în stare de curgere și suprafețele metalice de contact din vecinătatea zonei de injectare.

Se prezintă rezumativ câteva rezultate experimentale de referință relativ la efectele activării ultrasonice în timpul curgerii polimerilor topiți prin interstiții de mărime diferită (figura 2.1 și tabelele 2.1, 2.2 și 2.3).

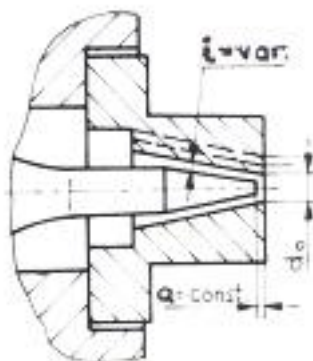


Fig.2.1. Interstițiu de curgere la extrudarea materialelor termoplastice activate ultrasonic

	i [mm]	Deplasarea axială a concentratorului i f, [mm]	$\Delta q(i)$ [%]	Temperatura materialului extrudat T, [°C]	Efectul de încălzire $\Delta T_A = T_A - T$, [°C]
HDPE	0,5	0,5	130,0	160	+73
	0,95	3,1	157,4		+78**
	1,40	5,7	133,8		+67
	1,76	7,8	118,3		+65
	2,13	9,9	104,1		+73
LDPE	0,5	0,5	198	180	+62
	1,0	3,2	234*		+68
	1,5	6,2	197		+59
	2,5	11,5	169		+48
PP	0,5	0,5	302	180	+60
	1,0	3,2	403*		+63**
	1,5	6,2	317		+55
	2,5	11,5	197		+48

Tabelul 2.1. Efectul activării ultrasonice la curgerea polimerilor topiți prin interstiții de mărime diferită

i [mm]	0,5	0,9	1,4	1,7	2
a [mm]	0,5	3	5,5	8	10

Tabelul 2.2. Set experimental I
i = variabil, a = variabil;
d₀ = 3mm, constant;
α = 10°

i [mm]	0,5	0,9	1,4	1,7	2
a [mm]	3	4	4,9	5,5	6,3

Tabelul 2.3. Set experimental II
i = variabil, d₀ = variabil;
a = 1mm, constant;
α = 10°

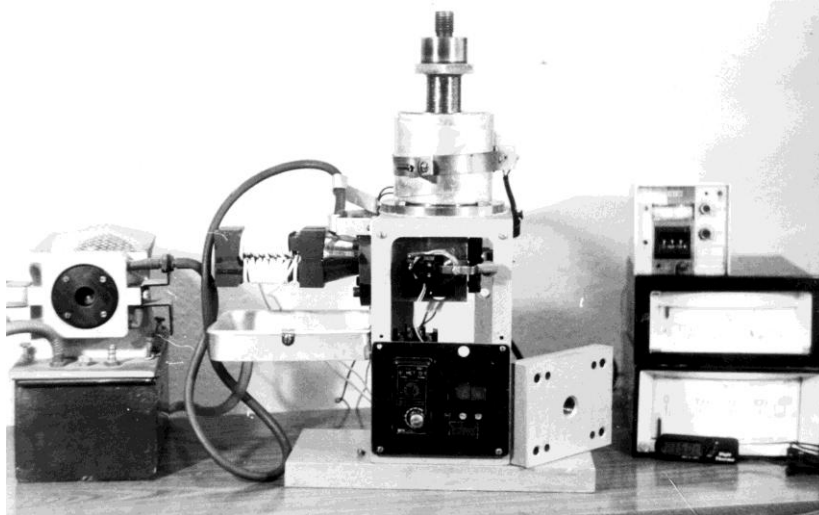


Fig.2.2. Montaj experimental pentru studiul preliminar al curgerii topiturilor de polimeri cu activare ultrasonică (20 kHz /100 W) [STA 99]

Lucrările științifice din anii 1990-2000 foloseau ca premiză simplificatoare viteza de deplasare nulă la peretele canalului de curgere (figura 2.3), deși rezultatele experimentale indicau alunecări ale topiturii de polimer la interfața polimer-metal. Răspândirea procedului de formare prin microinjectare a adus în atenția comunității științifice necesitatea găsirii unei soluții tehnice pentru provocarea alunecării la perete. Primele cercetări au fost orientate spre aditivarea și acoperirea peretelui metalic cu un strat fin de polimer halogenat rezistent la temperaturi înalte.

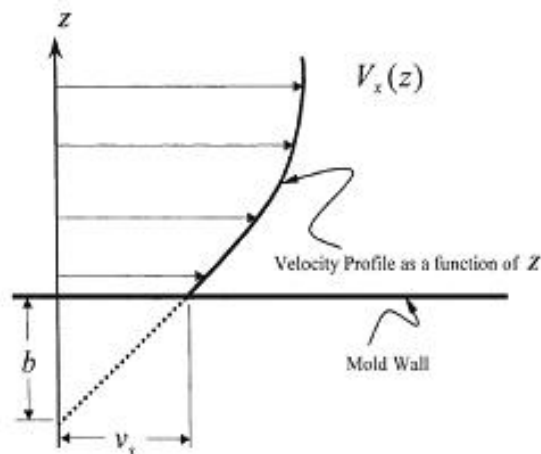


Fig. 2.3. Distribuție convențională de viteză (la perete $v = 0$)

Experimentele efectuate pentru fazele anterioare ale proiectului demonstrează sporirea semnificativă a debitului extrudat din momentul amorsării activării (creșteri de debit de 200...400%), situație ce poate fi explicată doar prin acceptarea deplasării materialului în vecinătatea peretelui canalului de curgere. Efectul termopelicular pus în evidență a fost considerat ca fiind cauza acestui

rezultat surprinzător. În ceea ce privește distribuția de viteză a topiturii în vecinătatea peretelui am considerat ca probabilă configurația prezentată în figura 2.4.

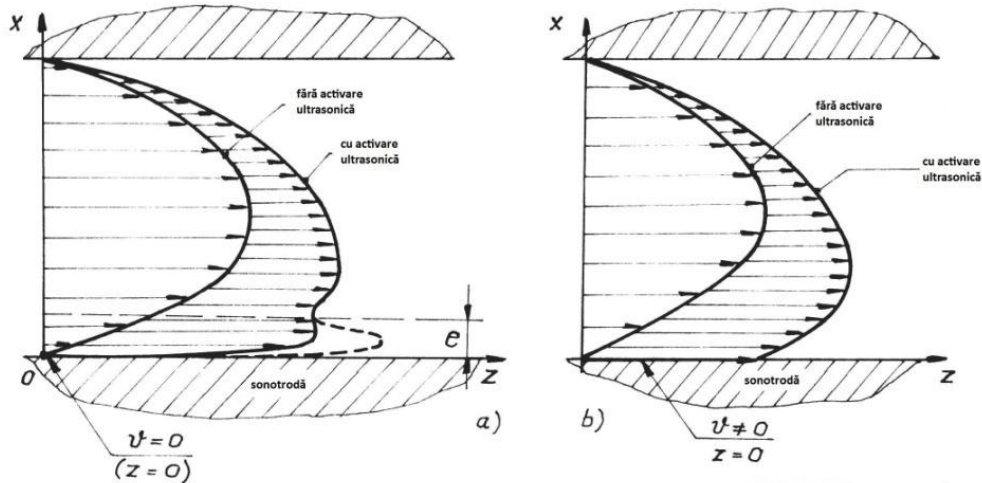


Fig. 2.4. Distribuția de viteză la curgerea topiturii de polimer activată ultrasonic

Rezultatele cercetarilor întreprinse au permis într-o primă fază ipoteza ameliorării performanțelor unei matrițe de injectat cu canale calde prin controlul curgerii materialului polimeric topit, rezultând o distribuție favorabilă a temperaturii în vecinătatea duzei de injectare cu cuiburile matriței și diminuarea defectelor de curgere asociate unui regim de procesare nefavorabil.

Noutatea adusă constă în modul de adaptare al formei și dimensiunilor rezonante ale convertorului ultrasonic, în special a concentratorului, astfel încât efectul ultrasonic termopelicular să se producă cu maximă eficacitate, atât în vecinătatea duzei de injectare, cât și pe traseul final de curgere al topiturii polimerice.

Pe parcursul traseului de curgere temperatura topiturii scade (figura 2.5), motiv pentru care, în matrițele de injectare clasice, încălzirea zonei cuiburilor de formare se face prin elemente electrice rezistive sau prin curenți de inducție (figura 2.6).

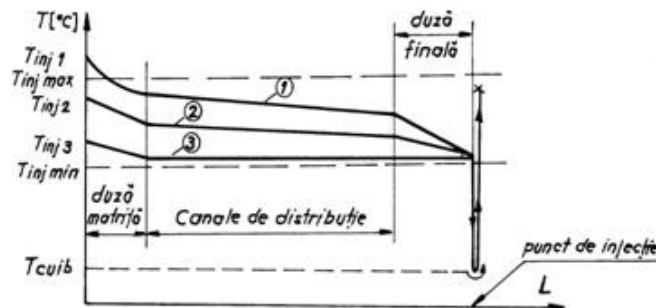


Fig. 2.5. Evoluția temperaturii topiturii în funcție de lungimea canalelor de distribuție

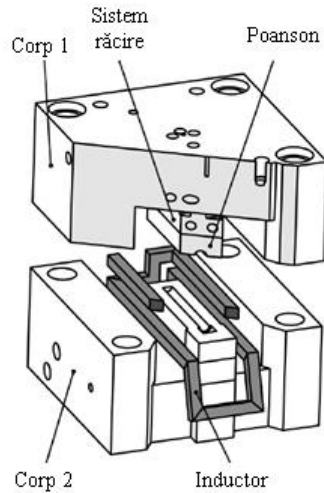


Fig. 2.6. Matriță de injectat cu sistem de încălzire prin curenți de inducție

Urmărind forma și dimensiunile zonelor din vecinătatea cuiburilor de formare ale unor matrițe de injectare cu canale calde se poate observa o relativă compatibilitate cu un sistem ultrasonic rezonant :

- forma duzei de injectare este compatibilă cu forma concentratorului adaptor de undă;
- dimensiunile duzei de injectare sunt compatibile cu cele ale concentratorului adaptor de undă dimensionat în multipli de $\lambda/2$.

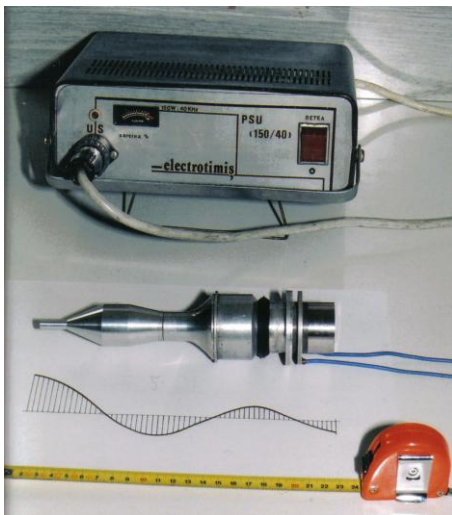


Fig. 2.7. Ansamblu convertor ultrasonic

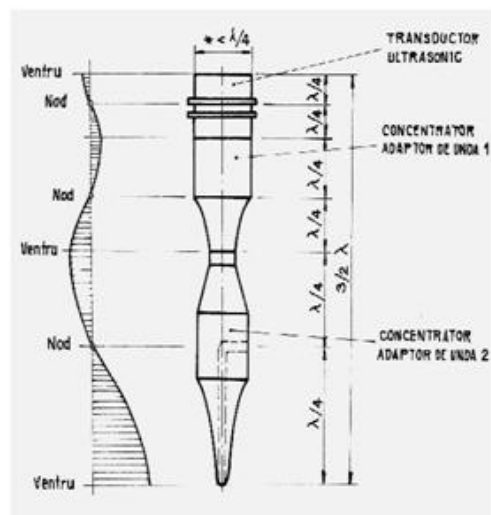


Fig. 2.8. Distribuția de amplitudine a frontului de undă

Sistemul rezonant redat în figurile 2.7 și 2.8 este alcătuit dintr-un generator de ultrasunete cuplat cu un ansamblu transductor-concentrator adaptor de undă,

acesta din urmă putînd fi integrat în construcția unei matrițe în diferite variante constructive.

În cele ce urmează se face o prezentare sumară a celor mai reprezentative soluții tehnice pentru matrițele de injectat activate cu ultrasunete aflate în prezent în curs de aplicare și evaluare la firma constructoare de matrițe Nano Inteliform Timișoara.

Invențiile (cereri Bv. numărul 00793/2006 și 00792/2006, titular Univeristatea „Politehnica” din Timișoara, autori Tudor Iclănzan și Daniel Stan) se referă la un concept inventiv de matrițe cu canale calde pentru injectarea materialelor polimerice și compozite termoplaste. Pentru îmbunătățirea condițiilor de injectare în cuiburi și pentru ameliorarea calității pieselor injectate, se folosește un convertor ultrasonic format dintr-un transductor ultrasonic și concentratoare adaptoare de undă plasate în dreptul cuiburilor de formare. Capătul activ al concentratorului generează în imediata vecinătate a anticamerei de injectare un puternic efect termopelicular asupra materialului polimeric ce parcurge canalul său central și totodată un efect termic în vecinătatea suprafeței sale exterioare, învecinată cu anticamera (5) și cu orificiul de injectare în cuibul matriței (figura 2.9). Rezultatul este o scădere semnificativă a vâscozității aparente, o puternică încălzire locală a materialului injectat în zona adiacentă duzei de injectare și implicit o reducere a consumului energetic, o scurtare a ciclului de injectare și o ameliorare a calității pieselor injectate [ICL 06].

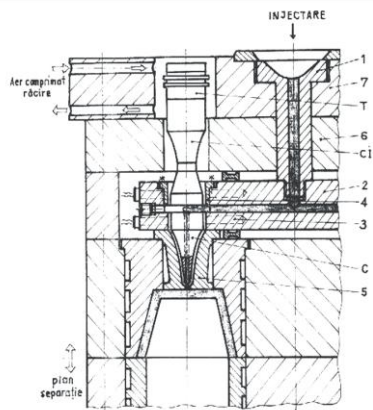


Fig. 2.9. Invenția principală 00793/2006 [ICL 06]

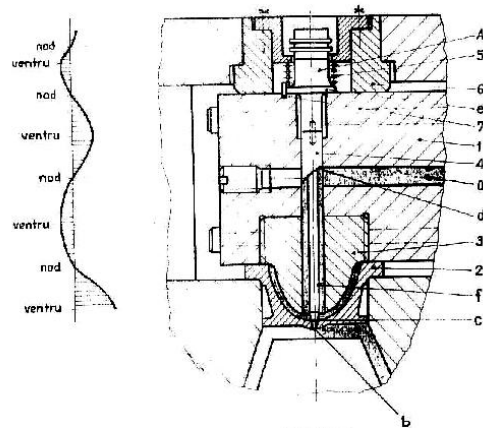


Fig. 2.10. Invenția dependentă 00792/2006 [ICL 06]

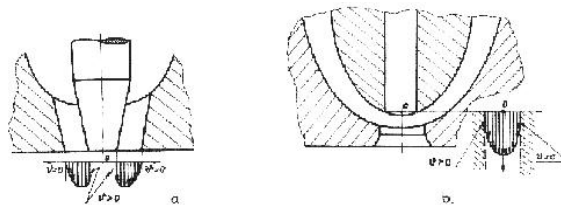


Fig. 2.11. Scheme reprezentând distribuția vitezelor de curgere în dreptul duzelor de injectare

În cazul extrudării, soluțiile constructive ale dispozitivelor proiectate sunt redată în figura 2.12:

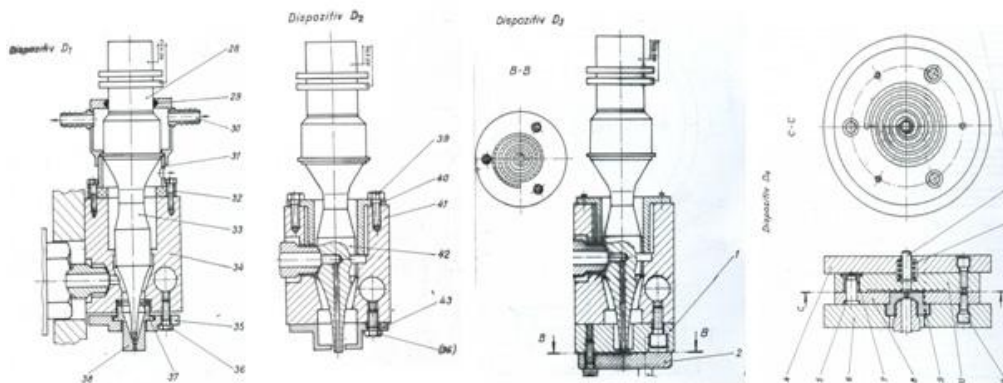


Fig.2.12. Soluții tehnice pentru capete de extrudare activate ultrasonic [construcție UPT]



Fig.2.13. Echipamentul ultrasonic-generatoare și convertoare (transductor+concentrator) [construcție UPT]

Rezultatele principale ale cercetării:

- Creșterea debitului de material extrudat între 200-400 % (în funcție de material și condițiile de extrudare);
- Creșterea temperaturii materialului topit la ieșirea din filieră cu până la 60 °C.

Limitele cercetării:

- Studiile au fost realizate pe un montaj experimental de tip rheometru cu variație a unui interstițiu activ ce reproduce parțial condițiile tehnologice specifice injectării și extrudării;
- Este de așteptat ca pentru soluții de tip industrial efectele să nu mai fie la fel de spectaculoase ca și în cazul încercărilor experimentale;

- Se pare că soluția activării optime constă în găsirea unei densități ideale a energiei de activare și localizarea acesteia în zone sensibile la formarea produsului injectat sau extrudat pentru a se evita riscuri de degradare a materialului.

2.2. Programul de cercetare și dezvoltare ULTRA-MELT

Programul de cercetare și dezvoltare ULTRA-MELT [www.ultramelt.org], desfășurat în perioada 2003-2006 și finanțat de Comunitatea Europeană, asupra aplicării energiei ultrasonice în procedeele de injectare și extrudare, a fost realizat sub tutela mai multor asociații patronale și unități de producție și cercetare:

- The Polymer Machinery Manufacturers & Distributors Association (Marea Britanie);
- The Danish Plastics Federation (Danemarca);
- AVEP Asociacion Valenciana de Empresarios de Plasticos (Spania);
- ASSOCOMAPLAST Italian Plastics & Rubber Processing Machinery and Mould Manufacturers Association (Italia);
- Parteneri industriali: AEMSA (Spania), Branson (Germania), Billion (Marea Britanie), BM BIRAGHI (Italia), Demag Hamilton (Marea Britanie), DKI Plast AS (Danemarca), Dynisco (Marea Britanie), GEFTRAN (Italia), Herman Ultraschalltechnik (Germania), Husky (Canada), THERMOPLAY (Italia);
- RTD Performers: AIMPLAS (Spania), CESAP (Italia), Fraunhofer TEG (Germania), PERA (Anglia).

Informațiile privind rezultatele obținute în acest program sunt puține și mai mult de natură publicitară și comercială potrivit filozofiei de piață a finanțatorilor. În fapt, soluțiile concrete de activare sunt doar parțial protejate prin brevete, doar atunci când există un anumit interes de piață, în majoritatea cazurilor acestea fiind secretizate deoarece se referă în primul rând la mijloace de producție și doar în cazuri rare la produse pe piață.

Din aceste puține informații rezultă totuși că, printr-o soluție de activare ultrasonică în canalul central al blocului distribuitor al unei matrițe cu canale calde (figura 2.14), se pot obține scăderi ale vâscozității polimerului topit cu 50% (figura 2.15).

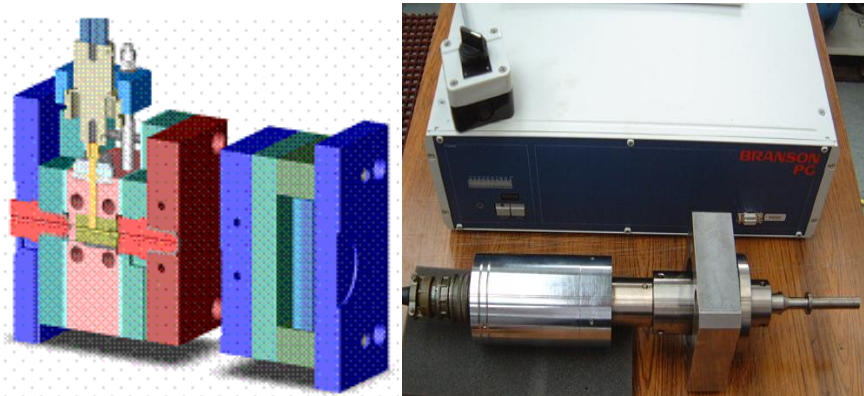


Fig.2.14. Soluție tehnică de activare ultrasonică pentru o matriță de injectare [www.ultramelt.org]

ULTRA-MELT Projeet

Effect of Ultrasonics is demonstrated here with Spiral Tool



KEY POINTS ON PROCESSING CHANGES

– As a result of the melt viscosity being lowered by up to 50%

Fig.2.15 – Spirale Griffith corespunzătoare injectării cu sau fără ultrasunete [www.ultramelt.ro]

Rezultatele principale ale cercetării:

- Scăderi ale vâscozității polimerului topit cu 50%;
- Beneficii declarate ca fiind obținabile: reducerea costurilor cu materialele, reducerea forțelor de închidere a matritelor, posibilitatea injectării pieselor cu pereți subțiri, scăderea temperaturilor topiturii și matritelor, îmbunătățirea stării suprafețelor pieselor injectate, scurtarea ciclurilor de injectare, reducerea riscurilor de degradare termică;
- Oportunități declarate de aplicare: piese optice, piese cu pereți subțiri, micropiese, nanocompozite.

Limitele cercetării:

- Date tehnice inaccesibile privind soluțiile tehnice și procedurile corespunzătoare;
- Soluții comerciale în așteptare.

2.3. Brevete de invenție pentru matrițe de injectare activate ultrasonic

Matrițele de injectare sau capetele de extrudare constituie scule sau echipamente de producție pentru realizarea produselor din materiale plastice ce se regăsesc pe piață și care ar trebui în mod normal să fie protejate prin brevete de invenție, mărci sau modele industriale. Însă doar matrițele sau capetele de extrudare de construcție specială se secretizează; atunci când există un domeniu emergent de interes pentru producători, aceștia procedează și la brevetarea acestor echipamente.

Cercetarea literaturii de specialitate privind activarea cu ultrasunete nu a condus la niciun rezultat elocvent. Studiile făcute publice, prin articole sau conferințe, nu au scos în evidență decât tangențial existența unor preocupări la nivel de cercetări fundamentale sau aplicative. În mod surprinzător, literatura de brevete semnalează brevetarea unor soluții tehnice în special în Japonia, SUA și România. Cele mai reprezentative sunt următoarele:

- Bv. No. 118576 B/2003 Romania „Matriță de injectare activată ultrasonic”
- Bv. No. 118400 B/2003 Romania “Procedeu și cap de extrudare activat ultrasonic”
- Bv. No. 2000271971/2000 Japon „Sprueless miniature runner type mold applying ultrasonic energy”
- Bv. 2001001370/2001 Japon “Ultrasonic injection mold”
- Bv. 3161317/1991 Japon “Injection compression mold”
- Bv. 2001062878/2001 Japon „Ultrasonic injection mold for optical disk”
- Bv. 6,464,485 B1/2002 USA “Ultrasonic injection mold for an optical disk”

Dintre soluțiile brevetate mai sus amintite este interesant de comentat asupra unei matrițe pentru realizarea unor discuri optice în care activarea se produce efectiv în cuib facilitată fiind de existența unei compatibilități dimensionale și de formă între poansonul matriței și concentratorul adaptor de undă (figura 2.16). În cuibul matriței se realizează un sistem oscilant de tip placă liber, evitându-se atenuarea undelor ultrasonice. Soluția este aplicabilă cu eficiență maximă doar la piese de tip disc.

ULTRASONIC INJECTION MOLD FOR OPTICAL DISK

Publication number: JP2001062878
Publication date: 2001-03-13
Inventor: IIDA TETSUYA; SHIDA NOBUYOSHI; SUGA KEIJI; ISHIGURO KENICHI; AZUMAYA YASUNOBU; SATO JUN; KATAGIRI KUNITOSHI
Applicant: PIONEER ELECTRONIC CORP; PIONEER VIDEO CORP; IDEMITSU PETROCHEMICAL CO
Classification:
 - international: **B29C45/26; B29C45/56; B29C45/26; B29C45/56;** (IPC1-7): B29C45/26; B29L17/00
 - european: B29C45/26L; B29C45/56E
Application number: JP20000139861 20000512
Priority number(s): JP20000139861 20000512; JP19990177615 19990624

Report a data error here

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 surfaces 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 movable side mold 4 or 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 pref. formed at places of $n\lambda/4$ ($n=1, 3, 5 \dots$) from an ultrasonic input part.

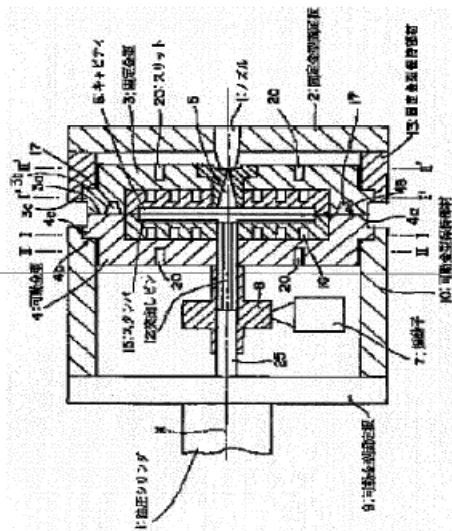


Fig.2.16 – Matriță pentru injectarea discurilor optice activată ultrasonic [Bv. 2001062878/2001 Japon]

O altă soluție brevetată are în vedere montarea unui convertor ultrasonic în corpul matriței, fixat în corpul distribuitor al canalelor calde, activarea ultrasonică fiind focalizată la nivelul duzei de injectare în cuiburile de formare. Această soluție este apropiată de cea indicată în proiectul Ultra-melt și practic similară cu cea cuprinsă în brevetul românesc Bv. Nr. 118576/2003. Este interesant de remarcat că solicitarea brevetării este ulterioară brevetului românesc, dar brevetarea propriu-zisă precede varianta românească (figura 2.17).

SPRUELESS MINIATURE RUNNER TYPE MOLD APPLYING ULTRASONIC ENERGY

Publication number: JP2000271971
 Publication date: 2000-10-03
 Inventor: OKA NOBUO; KOYAMA KAZUTOSHI
 Applicant: MEISEI KINZOKU KOGYOSHO KK
 Classification:
 - international: B29C45/26; B29C45/73; B29C45/26; B29C45/73; (IPC1-7): B29C45/26; B29C45/73
 - european:
 Application number: JP19990122848 19990324
 Priority number(s): JP19990122848 19990324

Report a data error here

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.

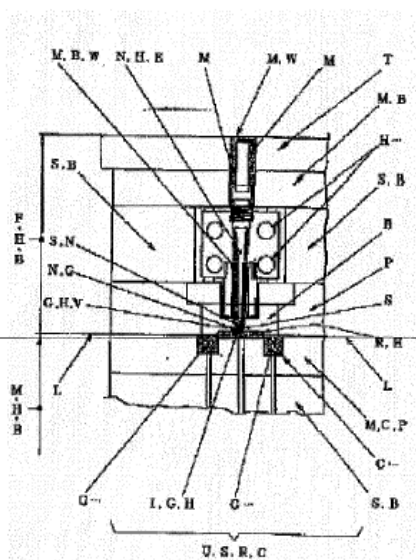


Fig.2.17. Matriță de injectare miniaturală activată ultrasonic [Bv. No. 2000271971/2000 Japon]

O altă soluție tehnică interesantă din punct de vedere al modului de activare ultrasonică este prezentată în figura 2.18. În esență, construcția matriței se bazează pe forma și dimensiunile unui convertor ultrasonic cu corpuri adaptoare de undă proiectate în $\lambda/2$ la îmbinarea cărora se materializează cuibul. Dimensiunile convertorului sunt limitate de dimensiunile de rezonanță ale sistemului. Atenuările undelor ultrasonice și pierderile energetice fiind minime, soluția poate prezenta un interes deosebit pentru microinjectare.

Puținele informații publice privind microinjectarea conduc la concluzia că în prezent se realizează piese de dimensiuni foarte mici (de ordinul micronilor) pentru utilizări în special în microtehnica și în aplicațiile biomedicale doar de câteva firme consacrate din Statele Unite ale Americii și Elveția, care au reușit adaptări tehnologice adecvate ale mașinilor de injectat, a matrițelor și a controlului proceselor. Detaliile tehnice date publicității sunt însă irelevante, neprezentând modalitatea de rezolvare a problemelor specifice procedurii de microinjectare. Din

acest punct de vedere activarea ultrasonică a procesul de microinjectare pare a fi o alternativă interesantă.

ULTRASONIC INJECTION MOLD

Publication number: JP2001001370
 Publication date: 2001-01-09
 Inventor: KATAGIRI KUNITOSHI; SATO JUN; YONEKAWA FUTOSHI
 Applicant: IDEMITSU PETROCHEMICAL CO
 Classification:
 - international: **B29C45/26; B29C45/26;** (IPC1-7): B29C45/26
 - european:
 Application number: JP19990177614 19990624
 Priority number(s): JP19990177614 19990624

Report a data error her

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 20 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.

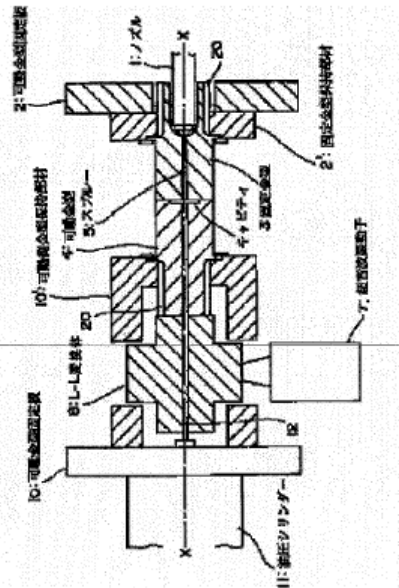


Fig.2.18. Matriță de injectare activată ultrasonic [Bv. 2001001370/2001 Japon]

Rezultatele principale ale cercetării:

- Brevetele indică soluții tehnice concrete pentru aplicații punctuale;
- Existența brevetelor indică emergența unui sector de activitate și anume cel legat de activarea ultrasonică a proceselor ce implică curgerea polimerilor topiți.

Limitele cercetării:

- Pentru preluarea unei aplicații brevetul trebuie însoțit de know-how-ul aferent;
- Există posibilitatea ca brevetarea să se fi făcut cu intenția protecției preventive, iar aplicația propriu-zisă să fie încă în fază de cercetare/dezvoltare.

2.4. Injecția ultrasonică prin adaptări pe echipamente de tip industrial

În teza de doctorat cu titlul „Cercetări teoretice și experimentale privind activarea cu ultrasunete a proceselor de curgere a materialelor polimerice” elaborată de ing. Alin Sîrbu s-a realizat în perioada 2007-2010 o cercetare teoretică și experimentală a efectelor activării cu ultrasunete (creștere de debit și ameliorare a defectelor) în procesele de injecție a materialelor polimerice folosind echipamente de tip industrial (ansamblu convertor ultrasonic + mașină de injectat + matriță). În cadrul cercetării s-au obținut următoarele rezultate:

- Creșterea de productivitate și ameliorare a calității produselor;
- Creșteri relative ale debitului de curgere cuprinse în medie între 10 și 30%;
- Ameliorări evidente ale calității produselor fără consumuri suplimentare considerabile de energie.

Activarea proceselor de injecție în matriță a materialelor polimerice prin producerea efectului ultrasonic termo-pelicular ne permite, printr-o logică de similitudine și extrapolare, presupunerea că efectul ultrasonic termopelicular ar putea fi salutar în procesele de fabricare a pieselor cu pereți subțiri și în microinjecție.

Este de așteptat ca:

- Umplerea microcavităților să se facă în condiții mai bune;
- Curgerea materialului termoplastic prin microstructuri să se amelioreze;
- Defectele legate de o solidificare prea rapidă a materialului polimeric injectat să fie îndepărtate;
- Demularea să se îmbunătățească;
- Construcția matriței să se simplifice.

Sintetizând observațiile privind rezultatele și limitele fiecăruia din studiile mai sus amintite, se pot deduce două aspecte fundamentale care ar putea constitui obiectivul de cercetare din prezenta teză și anume:

- Se prefigurează două aplicații majore care ar putea prezenta un maxim interes pentru aplicarea activării cu ultrasunete a proceselor ce comportă curgerea polimerilor topiți și anume fabricarea prin **injecție/extrudare a pieselor cu pereți subțiri** și fabricarea pieselor miniaturale prin **microinjecție**.
- Pentru ambele orientări mai sus evocate se impune definirea unor **proceduri și montaje** experimentale adecvate care să poată constitui **o platformă experimentală** relativ suplă și care să furnizeze rezultate ce pot fi transpuse cât mai ușor în soluții tehnice industriale.

2.5. Injectarea pieselor cu pereți subțiri

Injectarea pieselor cu pereți subțiri este definită în mod convențional ca fiind injectarea pieselor care au o grosime de sau mai mică de 1 mm și o arie a suprafeței de cel puțin 50 cm². Primele utilizări ale acestor piese au fost întâlnite în industria de containere și de ambalare. Utilitatea lor practică se datorează preocupărilor economice și ambientale pentru produse mai ușoare, mai compacte și mai puțin costisitoare, precum și rapiditatea cu care pot fi obținute datorită timpului redus de răcire al piesei în timpul procesului.

Grosimea stratului de material depus la perete fiind aceeași, diferențele dintre injectarea clasică și injectarea pieselor cu pereți subțiri se remarcă la nivelul secțiunii libere de curgere (figura 2.19). Progresele sistemelor de control ale procesului au permis utilizatorului supervizarea mai atentă a întregului proces de injectare, rezultând fabricarea de piese de dimensiuni foarte precise, în limitele inferioare de toleranță.

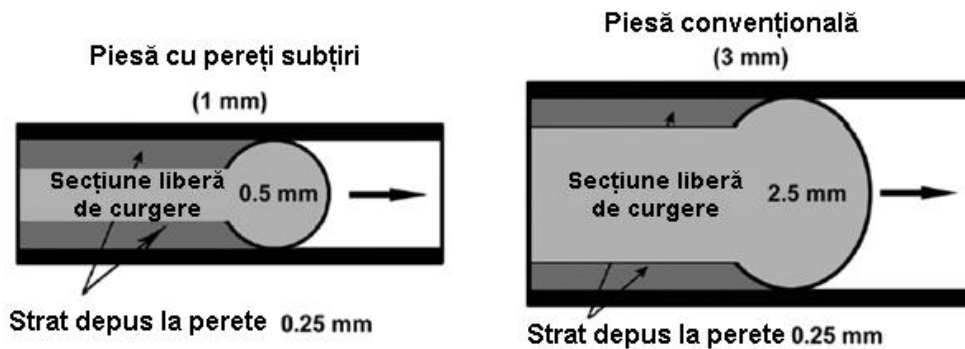


Fig. 2.19. Diferența dintre injectarea pieselor cu pereți subțiri și injectarea clasică [GHA 06], [SMI 98]

2.6. Microinjectarea

Analiza pieței microsistemelor arată că 40 miliarde de dolari americani au fost cheltuiți până în anul 2002 pe microdispozitive, în principal în industria auto (senzori de presiune și accelerație), în comunicații și în industria calculatoarelor (capete de citire/scriere, piese ce intră în alcătuirea hard-discurilor, ecranelor plate, a monitoarelor, etc.). Chiar dacă piesele din polimeri nu domină piața acestor produse (întâietatea deținând-o siliciul), totuși ele performează excelent în domeniul precum tehnica medicală, biotehnologie sau în producția de componente plastice pasive pentru rețelele optice. Exemple de piese obținute prin microinjectare sunt micromotoare și roți dințate, comutatoare optice, senzori ai glicemiei și ai tensiunii arteriale precum și componente pentru chirurgia minimal invazivă (figura 2.20).



Fig. 2.20. Repere produse prin microinjectare [KEM 00]

Se întrevide dezvoltarea pieței pieselor microstructurale (de dimensiuni cuprinse între câțiva și până la 100 μm), estimându-se atingerea unor valori de mai multe miliarde de dolari. În acest context, injectarea în matrită rămâne cel mai uzual și eficient proces de producție de masă, chiar și în domeniul componentelor miniaturizate.

Pachetele software special concepute pentru asistarea proceselor de injectare în matrită au fost introduse în industrie încă de la începutul anilor '80 datorită necesității de a reduce în permanență timpii de dezvoltare și costurile de producție.

Cu ajutorul acestor programe specializate au putut fi previzionate umplerea cavităților de formare ale matritei, post umplerea, contracția sau deformarea pieselor din materiale plastice, injectarea în matrite standard a pieselor plate sau cu pereți subțiri, etc. Pentru a avea succes în tentativa de cucerire a pieței pieselor microstructurale, cercetările teoretice și experimentale cu privire la microinjectarea materialelor plastice trebuie să aibă ca punct de plecare cantitatea foarte vastă de informație cu referire la procedeul clasic de injectare. La Institutul pentru Microtehnologie din Mainz (IMM) au fost efectuate simulări de injectare pe un program comercial în vederea verificării aplicabilității lui la procesul de microinjectare [KEM 00]. Formele caracteristice și dimensiunile extrem de reduse ale pieselor rezultate precum și distribuțiile specifice ale fronturilor de curgere pentru diferite materiale polimerice au arătat că soluțiile oferite de programe nu sunt suficiente pentru a descrie toate efectele ce au loc în cazul microinjectării. De aceea, pentru a reda mai fidel modalitatea de umplere a microcavităților de injectare, este în dezvoltare la Universitatea Catolică din Louvaine (UCL) o aplicație tranzitorie tridimensională.

În general, piesele din plastic rezultate în urma microinjectării sunt caracterizate de dimensiuni constructive având limitele de toleranță situate în domeniile micronului și ale zecimii de micron. Producerea unor astfel de repere

trebuie să se realizeze cu o precizie foarte ridicată, cavitățile lor de formare fiind atașate unor matrițe standard folosite la procedeul convențional de injectare.

Tehnologia LIGA permite obținerea de piese injectate care prezintă inserții având dimensiuni de ordinul micronilor sau chiar mai mici (atașarea unor structuri de microtest la o placă de bază). În prezent, rețelele injectate prin intermediul acestei tehnologii sunt considerate a fi cele mai fine structuri existente pe piață (figura 2.21).

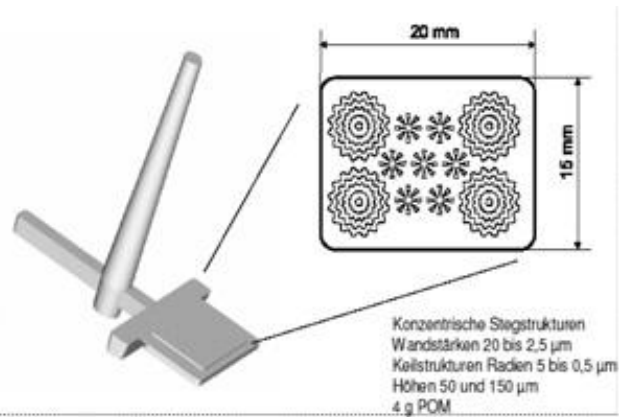


Fig. 2.21. Rețea fină de canale LIGA – studiu reologic de umplere a microcavităților [SCH 03]

Pentru a furniza programului care realizează simularea proceselor de microinjectare suficiente date cu privire la materialul polimeric procesat, este necesară cunoașterea comportamentului reologic a cât mai multor polimeri termoplastici de uz general. De aceea, spiralele de curgere folosite în mod uzual sunt înlocuite cu recent conceputele structuri folosite la investigările experimentale realizate anterior în cadrul Institutului pentru Microtehnologie din Mainz. Noile inserții au la bază liniile directe folosite la investigarea limitelor de umplere a cavităților de formare la microinjectare. Încercările au fost realizate cu diferiți polimeri de uz general (polietilenă, polipropilenă sau polistiren) cunoscuți ca posesori ai unor excelente caracteristici la curgere. Structurile testate prezintă dimensiuni laterale cuprinse între 2,5 μm și 20 μm (figura 2.20) și sunt montate deasupra unei plăci de bază, fiind umplute cu material printr-un sistem de canale de curgere clasic.

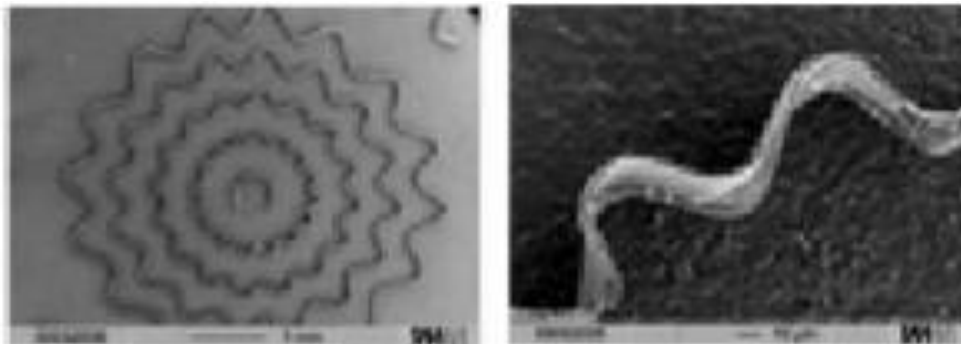


Fig. 2.22. Rezultatele injectării POM [KEM 00]

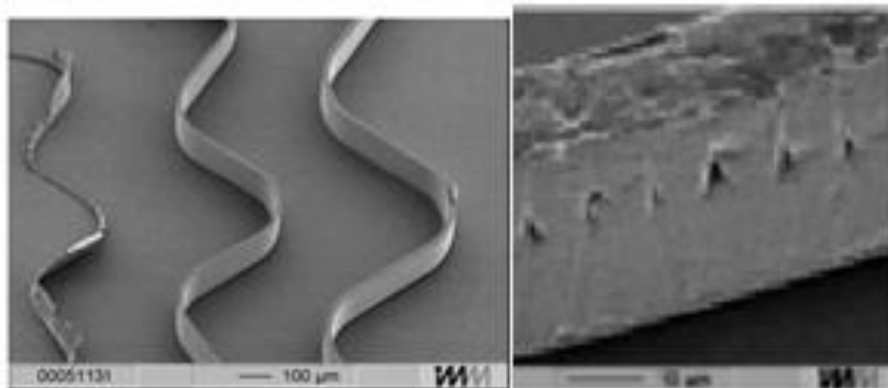


Fig. 2.23. Rezultatele injectării PPS [KEM 00]

Pentru produsele realizate din materiale plastice, noțiunea de „toleranță” poate avea mai multe interpretări, corelarea acestora fiind esențială pentru asigurarea calității reperelor rezultate. Proiectantul de produs o percepe ca o limitare funcțională, proiectantul matriței o interpretează ca o limitare tehnologică în definirea soluției constructive și a sculei de lucru, iar fabricantul matriței o consideră ca fiind toleranța de execuție.

Referitor la toleranțele produselor din material plastic, la injectarea cu echipament standard limitele minime ale unei erori dimensionale nu poate fi sub 0,05...0,15 mm. Piese mici, de precizie, pot fi realizate cu toleranța de $\pm 0,05$ mm, iar pentru dimensiuni mai importante se poate asigura un câmp de toleranță mai restrâns, dar nu sub valoarea de $\pm 0,02$ mm. Creșterea cerințelor de precizie dimensională majorează costul sculei și impune condiții speciale de reglaj și control. Când dimensiunile caracteristice ale piesei sunt sub 1 mm, se vorbește de procedee de microinjectare, iar toleranțele cotelor pot merge până la $\pm 0,005$ mm.

În condițiile menționate anterior, obiectivul tezei poate fi formulat de o manieră sintetică ca fiind cercetarea teoretică și experimentală a efectelor generate de acțiunea activării ultrasonice asupra curgerii materialelor polimerice prin orificii înguste specifice injectării pieselor cu pereți subțiri și microinjectării, precum și studiul adaptărilor constructive ale matrițelor aferente și a echipamentului ultrasonic utilizat.

Pentru îndeplinirea acestui obiectiv se au în vedere folosirea unor ansambluri ultrasonice formate din generator, transductor piezoelectric, concentrator adaptor de undă, celule experimentale specifice, matrițe experimentale și mașini de injectat materiale polimerice (una verticală, una orizontală) care constituie împreună cu aparatura de măsură și control platforma de lucru specifică.

Din obiectivul principal propus au derivat pe parcurs o serie de obiective secundare care au fost urmărite în prezenta lucrare:

- Studiul cercetărilor efectuate pe plan național și internațional cu referire la activarea ultrasonică a unor diferite procedee de punere în formă a materialelor polimerice;
- Adaptarea a două standuri experimentale prin proiectarea și executarea componentelor ce intră în structura lor;
- Construcția unor sisteme ultrasonice care să fie compatibile funcțional cu mașinile de injectat avute la dispoziție;

- Construcția unei matrițe pentru microinjectare activată ultrasonic pornind de la soluția tehnică a brevetului de invenție BV România 00838/2007;
- Realizarea unui set de încercări experimentale pentru a pune în evidență influența pe care o are energia ultrasonică introdusă în sistem asupra a diferitor parametri de proces;
- Evaluarea rezultatelor obținute și propunerea unor noi soluții constructive care să eficientizeze metoda.

Toate aceste cercetări au ca scop final studierea posibilității de implementare la scară industrială a activării ultrasonice a curgerii materialelor polimerice topite și pentru procedeele de injectare/extrudare a pieselor cu pereți subțiri și pentru microinjectare.

3. ADAPTAREA ECHIPAMENTULUI ULTRASONIC LA PROCES

3.1. Adaptarea echipamentelor ultrasonice utilizate

Aparatura experimentală de laborator folosită la activarea ultrasonică a diferitelor procedee tehnologice de punere în formă a materialelor plastice se împarte în două categorii:

- Aparatura care produce, transmite și concentrează energia ultrasonică în zona de lucru. Din această categorie fac parte generatorul ultrasonic, transductorul piezoelectric sau magentostriktiv, amplificatorul intermediar de undă (booster-ul) și concentratorul adaptor de undă (sonotroda);
- Aparatura de verificare și testare a diferiților parametri care caracterizează activarea ultrasonică (echipamentul de determinare a impedanței acustice și a frecvenței de rezonanță, generatorul de semnal și osciloscopul, dispozitivul electronic de măsură a amplitudinii de oscilație a undelor mecanice).

3.1.1. Echipamentul ultrasonic de lucru

Generatorul ultrasonic

Generatorul folosit la activarea ultrasonică a procedurii de microinjectare, precum și a curgerii topiturilor polimerice specifice injectării pieselor cu pereți este produs de către firma Branson, model 2000LPt (figura 3.1).



Fig.3.1 Generator ultrasonic Branson

Generatoarele Branson din familia 2000LP (low power) sunt generatoare ultrasonice de putere redusă, folosite la aplicații ce necesită puteri de până la 500W.

Aceste aparate permit reglarea amplitudinii în buclă închisă, fapt ce determină un excelent control al procesului de activare ultrasonică.

Principalele caracteristici ale generatorului în ceea ce privește interfața cu utilizatorul și controlul parametrilor de proces sunt:

- Posibilitatea de introducere în format digital a parametrilor de lucru;
- Achiziția datelor cu o frecvență de 1ms;
- Controlul digital al amplitudinii (generatorul permite un reglaj precis al amplitudinii într-un interval de la 10% pînă la 100%, cu incremente de 1%);
- Auto-diagnosticare și monitorizare (prin alerte vizuale, auditive și semnale logice).

Principalele particularități din punct de vedere energetic sunt:

- Regularizarea amplitudinii (reglarea amplitudinii în buclă închisă în cazul perturbărilor datorate fluctuației tensiunii de rețea);
- Auto-calibrare și memorare (AT/M) ale frecvenței de oscilație în intervale de $\pm 1000\text{Hz}$ în jurul valorii de 40 kHz, cu posibilitatea de memorare a frecvenței la finalul fiecărui ciclu;
- Detectarea automată a frecvenței de operare (când sistemul este inactiv) cu scopul de a identifica valoarea exactă a frecvenței la care lucrează concentratorul;
- Memorarea parametrilor ciclului în cazul opririi intempestive a instalației;
- Frecvență mare de cicluri (pînă la 200 de cicluri pe minut);
- Măsurarea puterii reale în timpul procesului cu înregistrarea valorii maxime dintr-un ciclu;
- Interfață de intrări/ieșiri pentru conectare directă la controlleri programabili.

Acest generator mai prezintă și un sistem de autoprotecție în cazul depășirii limitei admisibile pentru următorii parametri: tensiunea electrică, intensitatea curentului, temperatura, puterea sau în cazul diferențelor de fază;

Sistemul de avertizare vizual, auditiv și prin periferice de ieșire al generatorului identifică supraîncărcări, erori de funcționare sau de montaj.

În cazul în care frecvența concentratorului adaptor de undă se modifică sub acțiunea unor factori externi (temperatură sau presiune), acest generator are funcția de corecție a frecvenței de rezonanță a întregului ansamblu ultrasonic într-un anumit interval ($\pm 1000\text{Hz}$) față de valoarea nominală de 40kHz. Dacă frecvența concentratorului iese din această plajă de valori, ansamblul ultrasonic încetează să funcționeze și se impune o nouă calibrare a concentratorului.

Transductoarele ultrasonice

Pentru aplicațiile ce urmează a fi descrise în capitolele **4** și **5** s-au folosit două transductoare piezoelectrice de 40 kHz (figurile 3.2 și 3.3), menite să transforme energia electrică primită de la generator în energie mecanică de frecvență ultrasonică. S-a ales folosirea unor transductoare piezoelectrice în detrimentul celor magnetostrictive datorită factorilor de cuplaj electromecanic, respectiv de conversie acustică foarte buni pe care îl prezintă și a simplității lor constructive.



Fig.3.2. Transductor piezoceramic clasic ISIM Timișoara

Transductorul utilizat la activarea curgerii în cazul injectărilor pieselor cu pereți subțiri este construit cu o carcasă exterioară din aluminiu prevăzută cu orificii pentru a facilita răcirea corespunzătoare a transductorului (figura 3.3). Necesitatea folosirii unui astfel de transductor a fost determinată de condițiile termice în care au avut loc încercările experimentale respective, concentratorul adaptor de undă fiind în permanență în contact cu topitura polimerică. În absența unui sistem de răcire performant integrat, transductorul ultrasonic s-ar fi supraîncălzit, funcționarea lui fiind îngreunată, ba mai mult, existând chiar riscul de a fi distrus.



Fig.3.3. Transductor piezoceramic cu sistem de răcire integrat

Răcirea transductorului s-a făcut cu aer comprimat, el fiind prevăzut în acest sens cu un orificiu de intrare al aerului și cu mai multe orificii de evacuare dispuse de așa manieră încât să facă posibilă menținerea unei temperaturi constante pe toată suprafața discurilor piezoceramice ale transductorului.

3.1.2. Aparatura de verificare și testare

Verificarea diferitelor mărimi acustice (impedanța acustică, frecvența de rezonanță sau amplitudinea de oscilație) caracteristice unui sistem ultrasonic s-a făcut cu aparatură de laborator aparținând Institutului de Sudură și Încercări de Materiale Timișoara.

Echipamentul de determinare a impedanței acustice și a frecvenței de rezonanță

Echipamentul de determinare a impedanței acustice și a frecvenței de rezonanță (figura 3.4) măsoară valorile acestor două mărimi fizice pentru diferite configurații ale convertorului ultrasonic. Determinarea de către acest echipament a frecvenței de rezonanță în sarcină ne ajută la calibrarea concentratorului astfel încât toate componentele ansamblului ultrasonic să lucreze în permanență în regim de rezonanță.

Se conectează la bornele transductorului piezoceramic, procesând și afișând caracteristicile acustice ale convertorului ultrasonic într-un interval de frecvențe stabilit de utilizator.



Fig.3.4. Echipament de determinare a impedanței acustice și a frecvenței de rezonanță

Montaj experimental format din generator de semnal și osciloscop

Măsurarea frecvenței de rezonanță la care a fost dimensionat un concentrator adaptor de undă se poate realiza și prin intermediul unui stand experimental de laborator format dintr-un generator de semnal cu funcții programabile HAMEG HM 8130 și un osciloscop Tektronix TDS 2012 prezentate în figura 3.5.



Fig.3.5. Stand experimental de măsurare a frecvenței de rezonanță compus dintr-un generator de semnal HAMEG și un osciloscop Tektronix

Avantajul utilizării acestui stand experimental constă în posibilitatea de a vizualiza modul de propagare a undelor oscilatorii în orice punct al convertorului ultrasonic. Datorită acestei facilități, ne putem asigura că nodul undelor ultrasonice cade în zona de flanșă a concentratorului adaptor de undă, garantând astfel un randament maxim de transmitere a energiei ultrasonice către zona de lucru.

Echipament electronic de măsură a amplitudinii de oscilație a undelor mecanice

Pentru determinarea amplitudinilor de oscilație ale undelor ultrasonice am folosit aparatul de măsură Tesatronic TT10 prezentat în figura 3.6.



Fig.3.6. Echipament de determinare a amplitudinii de oscilație a undelor mecanice Tesatronic TT10

Acest aparat măsoară modificările dimensionale ale unui reper într-un interval de valori cuprins între 5 și 500 μm împărțit în 3 domenii de măsurare. Vârful acului comparator se fixează pe suprafața activă a concentratorului adaptor de undă, măsurând amplitudinea de oscilație a acestuia în timpul funcționării ansamblului ultrasonic.

3.2. Proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă

Majoritatea instalațiilor ultrasonice utilizează concentratoare de energie specifice fiecărei aplicații în parte, motiv pentru care proiectarea acestui component joacă un rol decisiv în asigurarea unei funcționări corespunzătoare a ansamblului ultrasonic. Concentratorul adaptor de undă, ca element de transfer și focalizare al energiei ultrasonice, are rolul de a produce la capătul său activ (opus transductorului) vibrații longitudinale de amplitudini și viteze cât mai mari. Proiectarea sa se realizează pornind de la ecuația potențialului acustic în ghidurile de undă, cunoscută sub numele de ecuația lui Webster:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x}(\ln S_x) \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

în care:

- $\varphi = f(x, t)$ reprezintă elongația oscilației;
- S_x este aria secțiunii concentratorului la distanța x de origine;
- c reprezintă viteza undelor ultrasonice.

Integrarea ecuației (2.1) se poate face pentru:

- concentratoare conice

$$S_x = S_0 (x/x_0)^2 \quad (3.2)$$

- concentratoare catenoidale

$$S_x = S_0 (x/x_0) \quad (3.3)$$

- concentratoare exponențiale

$$S_x = S_0 \cdot e^{mx} \quad (3.4)$$

- concentratoare cilindrice în trepte

$$S_x = k \cdot S_0 \quad (3.5)$$

Proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă se poate realiza prin intermediul a două metode:

- **metoda utilizării unor relații matematice** simplificate rezultate din rezolvarea ecuației lui Webster, combinată cu interpretarea unor nomograme.

Metoda de proiectare a concentratoarelor cu ajutorul relațiilor matematice se poate aplica la majoritatea aplicațiilor care folosesc instalații ultrasonice (prelucrări tehnologice, activări de procese) și în care au loc schimbări frecvente ale condițiilor de lucru (scule, piese activate) și ale factorilor perturbatori (solicitări mecanice sau termice).

- **metoda elementelor finite asistată de calculator**, eventual însoțită de utilizarea unor aparate de măsură de tipul analizatoarelor pentru verificarea proprietăților acustice ale materialelor folosite în construcția concentratoarelor.

Această metodă de proiectare foarte precisă a concentratorului, ca unic element de transfer al energiei ultrasonice, oferă posibilitatea unui randament maxim în funcționare și se aplică cu precădere la sudarea materialelor termoplastice

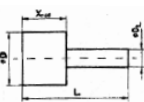
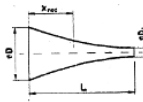
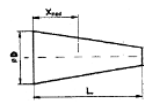
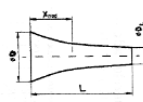
sau a metalelor în cazul seriilor mari de fabricație. Schimbarea condițiilor de lucru nu mai permite utilizarea aceluiași concentrator, o nouă dimensionare fiind necesară.

În practica industrială se folosesc în mod frecvent patru tipuri de concentratoare adaptoare de undă:

- concentratoare cilindrice în trepte;
- concentratoare exponențiale;
- concentratoare conice;
- concentratoare catenoidale.

În toate cele patru cazuri se vor folosi elemente de ajustare și corecție a relațiilor utilizate, având la bază date experimentale și de exploatare. Un rol important în proiectarea concentratorului îl joacă și transductorul ultrasonic folosit (fie piezoelectric, fie magnetostrictiv).

În tabelul 3.1 sunt prezentate legile de variație a secțiunii pentru fiecare dintre cele 4 tipuri de concentrator, precum și relațiile de calcul valabile pentru determinarea coeficienților teoretici de amplificare ai amplitudinii K_t , lungimii L a concentratorului și a poziției nodului undeii oscilatorii ce străbate concentratorul.

Tipul concentra- torului	CILINDRIC ÎN TREPTE	EXPONENȚIAL	CONIC	CATENOIDAL
				
Legea de variație a secțiunii	$D_x = D$ pentru $0 < x < l/2$ $D_x = d$ pentru $l/2 < x < l$	$D_x = D \cdot e^{-\beta x}$ $\beta = \frac{\omega}{C} \cdot \frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}}$ $N = D/d$	$D_x = D_0(1 - \alpha' \cdot x)$ $\alpha = \frac{D - d}{D \cdot l}$	$D_x = D \cdot \text{ch}[\gamma(l - x)]$ $\gamma = \frac{\text{arcch}(N)}{l}$
Coeficientul teoretic de amplificarea a amplitudinii K_t , [-]	$K_t = \left(\frac{D}{d}\right) = N^2$	$K_t = \frac{D}{d} = N$	$K_t = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)^2}$ $K_t < N$	$K_t = \frac{N}{\cos(k'l)}$ $K_t < N$
Lungime concentrator, L , [mm] dimensionat în $\lambda/2$	$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f}$	$L = \frac{C}{2f} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$l_k = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\alpha l}{\pi}$ unde αl este rădăcina ecuației: $\text{tg}(\alpha l) = \frac{\alpha l}{\frac{\alpha l^2 \cdot N}{(1-N)^2} + 1}$	$L = \sqrt{1 - \frac{1}{N^2} \cdot \text{arcch}N}$
Poziția nodului	$x = \frac{l}{2}$	$x = \frac{l}{\pi} \text{arctg}\left(\frac{\ln N}{\pi}\right)$	$x = \frac{l}{\alpha} \text{arctg}\left(\frac{\alpha}{\alpha'}\right)$ $\alpha = \frac{\omega}{C}$	$x = \frac{1}{K'} \text{arctg}\left(\frac{K'}{\pi} \text{cthy}'\right)$ $K' = \sqrt{\alpha^2 - \gamma^2}$

Tabelul 3.1. Relațiile de calcul folosite pentru dimensionarea concentratoarelor adaptoare de undă

3.2.1. Proiectarea concentratoarelor cilindrice în trepte cu ajutorul relațiilor de calcul

Concentratoarele cilindrice în trepte prezintă avantajul simplității în proiectare și execuție, dar prezintă și tensiuni mecanice considerabile la transmiterea și concentrarea energiilor mari.

Alegerea materialului concentratorului

Materialele care se folosesc la fabricarea concentratoarelor trebuie să prezinte o rezistență mecanică foarte bună, iar propagarea undelor oscilatorii mecanice prin ele să se facă cu atenuări de amplitudine cât mai mici. Materiale precum aliajele de aluminiu de înaltă rezistență, cele de titan sau oțelurile carbon sunt deseori alese datorită faptului că asigură un bun randament de transmisie al energiei ultrasonice. Un alt factor care joacă un rol important în alegerea materialului îl reprezintă particularitățile aplicației care folosește activarea ultrasonică.

Materialul ales pentru realizarea concentratorului în trepte este oțelul C 45. Pe lângă proprietățile acustice bune pe care le prezintă, este un material ieftin și ușor de prelucrat. Un alt avantaj în comparație cu aliajele de aluminiu îl constituie posibilitatea de a fi prevăzut cu filet interior, fapt ce-l face ușor de îmbinat prin înșurubare cu transductorul ultrasonic sau amplificatorul intermediar de undă. Acest tip de îmbinare facilitează transferul de energie ultrasonică, pierderile la suprafața de trecere dintre cele două elemente tinzând spre 0.

Aliajele de aluminiu, chiar dacă prezintă niște calități acustice remarcabile, sunt materiale moi și ușor deformabile, existând riscul ca îmbinarea lor prin înșurubare cu transductoarele să aibă de suferit la folosiri repetate.

Material	Modul de elasticitate E [daN/cm ²]	Densitatea ρ[kg/m ³]	Viteza sunetului C _L [cm/sec]·10 ⁵
Titan 318 A	1,16×10 ⁶	4,51×10 ³	4,8
Aliaj aluminiu D16 AlCu4Mg1,5Mn	0,7×10 ⁶	2,79 ×10 ³	5,08
C 45	2,16×10 ⁶	7,7 ×10 ³	5,25

Tabloul 3.2. Principalele proprietăți ale materialelor candidate selectate pentru realizarea concentratorului

Determinarea coeficientului teoretic de amplificare K_t

Coeficientul teoretic de amplificare a amplitudinii oscilațiilor de frecvență ultrasonică depinde de forma și dimensiunile concentratorului adaptor de undă. Valoarea acestui coeficient se calculează prin derivarea parțială a ecuației lui Webster.

La concentratoarele de semiundă cilindrice în trepte amplificarea teoretică a oscilațiilor se calculează cu ajutorul relației:

$$K_t = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (3.6)$$

$K_t = N^2$, unde N reprezintă forma de reducere a secțiunii

$$N = \frac{D}{d} \quad (3.7)$$

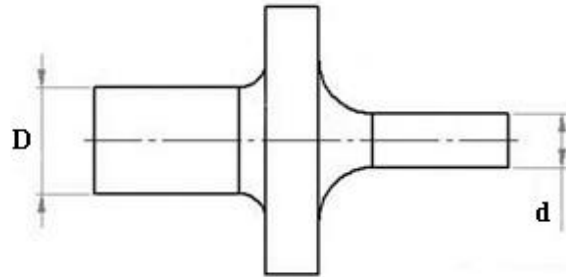


Fig.3.7. Diametrele celor două secțiuni ale concentratorului cilindric în trepte

D și d reprezintă diametrele celor două secțiuni ale concentratorului (figura 3.7). Din considerente tehnologice s-au ales valori de 20, respectiv 15 mm, rezultând următorul coeficient teoretic de amplificarea:

$$K_t = \left(\frac{20}{15}\right)^2 = 1,77$$

Determinarea lungimii de rezonanță L

Concentratorul trebuie obligatoriu să aibă lungimea egală cu jumătate de lungime de undă oscilatorie λ . După calculul dimensiunilor teoretice ale concentratorului, uzual se adaugă câțiva milimetri la lungimea obținută ca marjă de eroare. Acest volum suplimentar de material se înlătură parțial sau uneori chiar în întregime în urma verificării frecvenței proprii a concentratorului cu ajutorul montajului specializat de laborator (un generator de semnal și un osciloscop).

La concentratoarele în semiundă determinarea lui L se face cu relația:

$$L = \frac{C}{2 \cdot f \cdot 10^2} = \frac{\lambda}{2} [mm] \quad (2.8)$$

unde:

- C este viteza sunetului în material [cm/sec];
- f reprezintă frecvența de rezonanță [kHz].

În cazul în care nu cunoaștem cu exactitate valoarea teoretică a vitezei de propagare a sunetului într-un anumit material, o putem determina experimental. Cunoașterea precisă a valorii acestei viteze ne este necesară pentru dimensionarea corectă a concentratoarelor.

Alegerea frecvenței de lucru f este determinată de particularitățile aplicației unde dorim să utilizăm activarea ultrasonică și de generatorul ultrasonic pe care îl avem la dispoziție. În general se utilizează frecvențe în jurul valorii de 20 kHz, când transferul energetic și eficacitatea activării ultrasonice se desfășoară cu maximă eficacitate tehnologică. Utilizarea frecvențelor superioare acestei valori este impusă de natura diferitelor aplicații sau nevoia adaptării unor ansambluri ultrasonice de dimensiuni mai reduse. De exemplu, activarea ultrasonică a curgerii topiturilor polimerice sau a punerii în formă a materialelor plastice se face folosind o frecvență

de rezonanță a sistemului situată în intervalul 35 - 40 kHz. Adoptarea diferitelor frecvențe de rezonanță nu se poate face la orice valoare, chiar dacă o anumită frecvență ar părea mai oportună aplicației în cauză. Practic se pot alege frecvențe de 20, 28, 40 sau 100 kHz, valori determinate de componentele sistemului ultrasonic (generatoare sau transductoare ultrasonice) care se construiesc la aceste frecvențe. Pentru frecvențe superioare valorii de 100 kHz, pierderile energetice devin semnificative, iar efectele tehnologice scad în intensitate.

Pentru activarea ultrasonică a unei matrițe de microinjectare am ales o frecvență de rezonanță egală cu 40 kHz. În consecință, vom folosi un generator ultrasonic, respectiv un transductor care să lucreze la această valoare. De asemenea, proiectarea concentratorului adaptor de undă și a corpului reflector se va face ținând cont de această valoare a frecvenței.

$$L = \frac{5,25 \cdot 10^5}{2 \cdot 40 \cdot 10^2} = 0,065625 \cdot 10^3 = 65,625 [mm]$$

Această valoare a lui L reprezintă cu o aproximație acceptabilă lungimea semiunde și deci cea a concentratorului cilindric în trepte.

Plasarea nodului oscilațiilor X_0

Cota X_0 indică poziția nodului oscilațiilor ultrasonice, cunoașterea lui fiind necesară pentru precizarea cu exactitate a poziției flanșei de montaj și susținere mecanică a concentratorului.

$$X_0 = \frac{L}{2} = \frac{C}{4 \cdot f \cdot 10^2} [mm] \quad (2.9)$$

$$X_0 = \frac{5,25 \cdot 10^5}{4 \cdot 40 \cdot 10^2} = 0,0328125 \cdot 10^3 = 32,8125 [mm]$$

După cum se observă, la concentratoarele cilindrice în trepte X_0 se plasează la mijlocul semiunde, orice schimbare a formei concentratorului putându-i modifica poziția. De acest aspect se va ține cont la construcția montajelor industriale, când modificări de secțiune nesemnificative la prima vedere sau racorduri diferite la trecerile de secțiune vor impune reconsiderarea prin experimente și ajustări atât ale lungimilor concentratoarelor, cât și a plasării exacte a punctului nodal de oscilație.

Determinarea coeficientului efectiv de amplificare K_{ef}

Determinările practice ne-au arătat că, la sistemele ultrasonice rezonante, între valorile efective K_{ef} și teoretice K_t ale amplificării amplitudinii de vibrație nu există o proporționalitate directă. Nomograma experimentală din figura 3.8 permite evaluarea coeficientului efectiv K_{ef} .

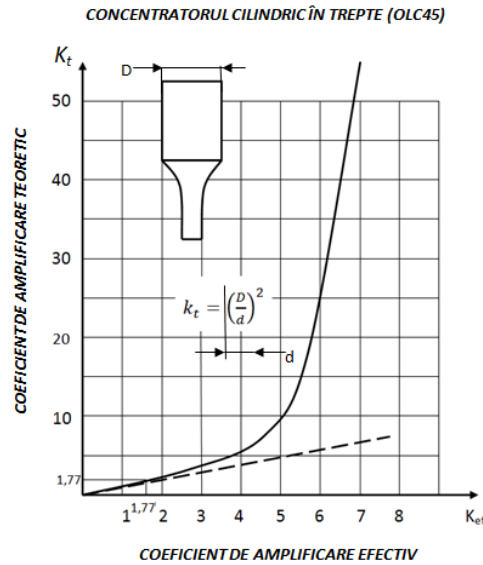


Figura 3.8. Nomogramă care prezintă dependența coeficientului efectiv de amplificare al amplitudinii K_{ef} în funcție de coeficientul de amplificare teoretic K_t

Unui coeficient teoretic de amplificare $K_t = 1,77$, obținut prin calcul matematic, nomograma îi asociază un coeficient efectiv $K_{ef} = 1,77$. Până la valori de 2, valorile celor doi coeficienți (K_t și K_{ef}) sunt sensibil egale, dar peste această valoare amplificarea reală este mult sub cea teoretică ceea ce face aproape inutilă proiectarea unor concentratoare „puternic amplificatoare”. Mai mult, nivelul tensiunilor mecanice generate în concentrator cresc la un nivel periculos, iar funcționarea în sarcină a unui asemenea concentrator adaptor de undă se face cu disipare puternică de energie.

Precizarea racordurilor de trecere

Pentru asigurarea unor tensiuni minime în zona de trecere de la un diamteru al secțiunii la altul, în zona de maximă solicitare a concentratorului, se vor alege constructiv, racorduri de 5 mm pentru tronsonul care face legătura între secțiunea de diamteru D și zona de flanșă, respectiv 10 mm pentru tronsonul de care face legătura între secțiunea de diamteru d și zona de flanșă (figura 3.9).

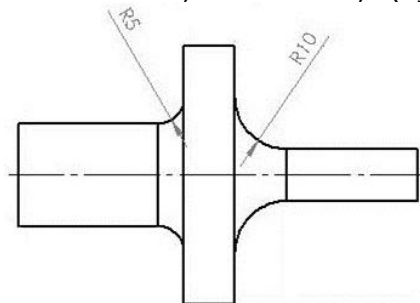


Fig.3.9. Racordurile prevăzute la trecerea de la secțiunile cilindrice ale concentratorului la zona de flanșă

Verificările experimentale au validat ca acceptabile aceste valori fără denaturări sensibile ale frecvenței de rezonanță.

Concluzie preliminară

În urma predimensionării concentratoarelor ultrasonice prin metoda de calcul am obținut informații esențiale în vederea calibrării acestor componente cu ajutorul programului CARD (Computer Aided Resonator Design).

Constrângerile dimensionale determinate de mașina de microinjectare nu ne ofereau drept date inițiale decât diametrele celor două concentratoare, valoarea lungimii lor rezultând în urma calculelor sistematice.

Calibrarea și dimensionarea finală a elementelor ansamblului ultrasonic se va realiza asistat de calculator, prin intermediul programului CARD.

Softul utilizat permite o calibrare dimensională de suficientă acuratețe chiar și prin introducerea unor modificări ale formei impuse de tehnolog aplicației (de exemplu, capătul final al concentratorului prevăzut cu gaură filetată de înșurubare).

3.2.2. Proiectarea concentratoarelor ultrasonice asistată de calculator

CARD (Computer Aided Resonator Design) este un program care aplică tehnici cantitative pentru proiectarea diferitelor elemente ultrasonice (concentratoare adaptoare de undă, amplificatoare intermediare de undă și transductoare ultrasonice), care sunt traversate de unde longitudinale. CARD oferă asistență în procesul de elaborare a concentratoarelor cu complexitate scăzută sau moderată.

Evaluarea din punct de vedere acustic a unui concentrator se poate face rapid de către CARD imediat după ce a fost proiectat. Orice modificare a formei sau a dimensiunilor lui va induce schimbări ale parametrilor săi acustici, determinate cu ușurință de către program. Folosirea acestui soft se pretează în special la proiectarea concentratoarelor cu rezistență scăzută, a concentratoarelor cărora li se impune din start un anumit factor de amplificare al amplitudinii, precum și a concentratoarelor cărora li se specifică poziția nodului de oscilație.

CARD realizează în mod automat calibrarea unui concentrator la frecvența dorită ajustându-i dimensiunile rezultate în urma proiectărilor preliminare. Mărimile care se pot ajusta sunt lungimea și dimensiunile transversale ale concentratorului, diametrul diferitelor secțiuni ale sale sau locul unde sunt plasate racordurile de trecere. În plus, programul poate modifica valoarea coeficientului de amplificare al amplitudinii de oscilație și reduce tensiunile din interiorul concentratorului.

Acest program permite analiza a numeroși parametri acustici (lungimi de undă, coordonatele nodurilor de oscilație, mărimi ale frecvențelor, factori de calitate, etc.) și trasează grafic valorile distribuite ale amplitudinii în lungul lungimii concentratorului (figura 3.10), transmițând vibrațiile către mediul de reacție. Rezultatele obținute pot fi vizualizate, salvate și imprimate.

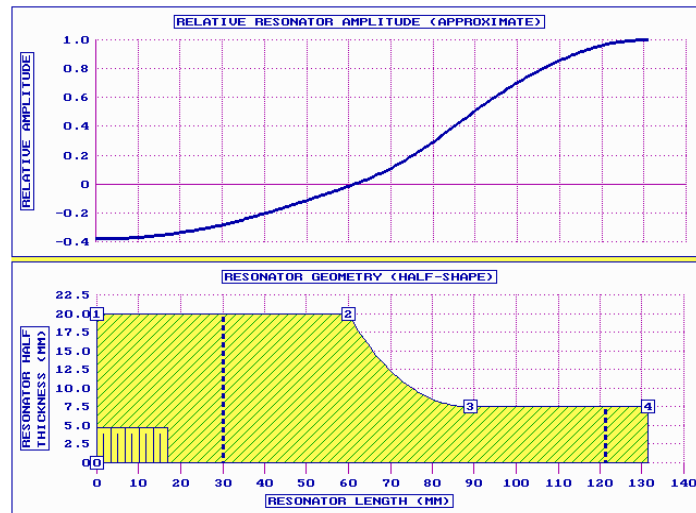


Figura 3.10. Distribuția amplitudinii oscilațiilor pentru un concentrator cilindric în trepte

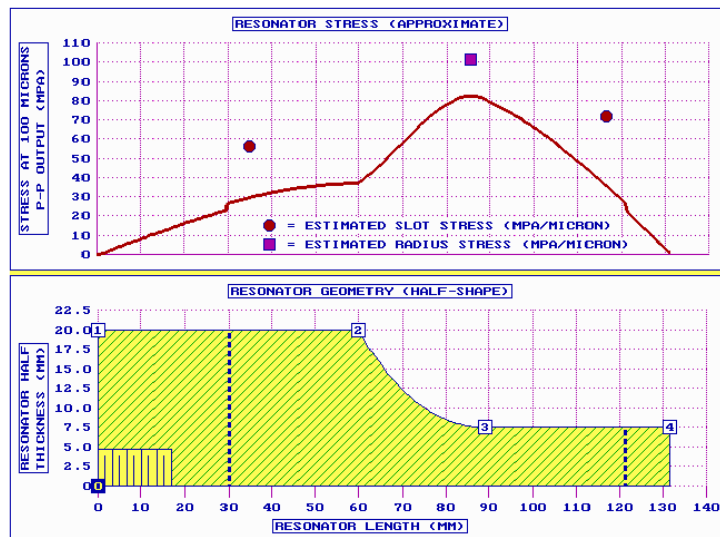


Fig. 3.11. Graficul variației tensiunii dintr-un concentrator cilindric în trepte

În timpul introducerii coordonatelor concentratorului poate fi previzualizată în orice moment forma și dimensiunile acestuia, urmărindu-se astfel în permanență corectitudinea cu care se face dimensionarea lui (figura 3.12). Elemente supuse calibrării pot prezenta forme de o complexitate medie, fiind prevăzute cu știfturi, canale, găuri, etc.

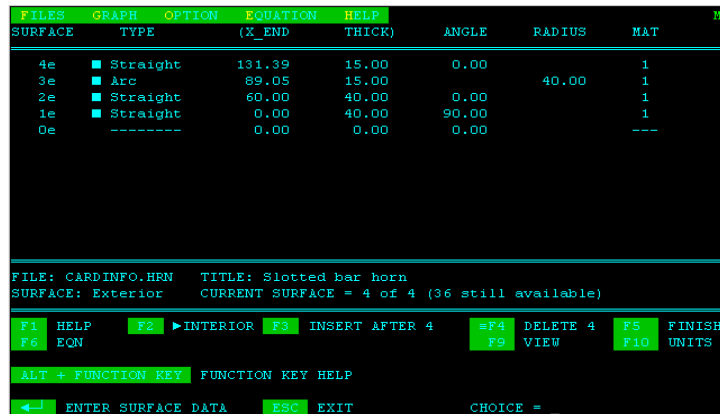


Fig.3.12. Interfața cu utilizatorul la introducerea datelor de intrare

Programul permite de asemenea alegerea materialului din care este fabricat concentratorul, punând la dispoziția utilizatorului o librărie care conține mai multe materiale folosite în mod curent. În cazul în care dorim să proiectăm un concentrator dintr-un material care nu există în baza de date, avem posibilitatea de a-l introduce, menționându-i caracteristicile.

Calibrarea automată a concentratorului se face prin împărțirea lui într-un număr extrem de mare de secțiuni de diametre foarte mici, perpendiculare pe axa de rotație a concentratorului (figura 3.13). Analiza concentratorului se face începând de la secțiunea vecină cu transductorul ultrasonic și se termină cu secțiunea situată de partea frontală a lui. Acest proces se reiterează până la atingerea unui anumit criteriu de convergență, impus de utilizator.

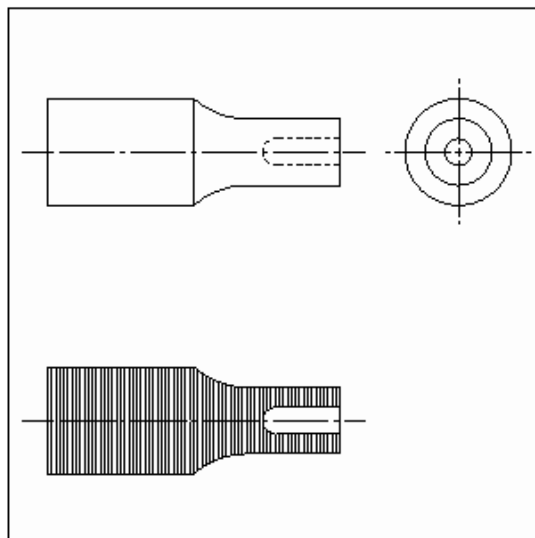


Fig. 3.13. Împărțirea concentratorului în secțiuni de grosime foarte mică în vederea calibrării sale

Toți parametrii se presupune a fi constanți în fiecare secțiune, prin urmare valorile tensiunilor interne și ale amplitudinii nu pot varia în planul secțiunii concentratorului, ci doar de-a lungul lungimii lui. Prin urmare, CARD poate fi considerat drept un instrument de analiză cu element finit unidimensional.

CARD ia în considerare scăderea vitezei de propagare a undelor în material la trecerea de la o secțiune de diametru inferior la una de diametru superior, motiv pentru care concentratoarele prevăzute cu o astfel de trecere de secțiune (de la diametru mai mic la diametru mai mare) vor avea lungimi mai mari.

Pentru calibrarea unui concentrator, CARD folosește două metode:

- **calibrarea automată:** atunci când frecvența de rezonanță a concentratorului este specificată, programul va dimensiona automat lungimea acestuia până când valoarea frecvenței este atinsă.

Programul poate ajusta automat lungimea, dimensiunile secțiunii concentratorului sau poziția și mărimea racordurilor. Această metodă permite de asemenea modificarea coeficientului de amplificare a amplitudinii la valoarea dorită, precum și minimizarea în mod automat a tensiunii mecanice.

- **calibrarea manuală:** dacă toate dimensiunile concentratorului sunt specificate, CARD va calcula frecvența de rezonanță a acestuia.

Se pot de asemenea modifica dimensiunile concentratorului pentru a se obține o anumită frecvență.

De cele mai multe ori se utilizează modul automat de calibrare, modul manual folosindu-se de obicei pentru reglări fine ale dimensiunilor, atunci când modul automat nu a realizat o calibrare adecvată.

Deși toate fenomenele acustice presupun propagarea undelor în spațiul tridimensional, există foarte multe tipuri de concentratoare și transductoare ultrasonice pentru care o analiză unidimensională este suficientă. Astfel de concentratoare sunt cele cilindrice simple (cu sau fără orificii) și cele cilindrice în trepte fără orificii. Concentratoarele cilindrice pot fi prevăzute cu găuri, atât timp cât dimensiunile lor sunt reduse. Concentratoarele proiectate prin intermediul CARD la frecvențe de 20 kHz pot avea lungimi de până la 250 mm și dimensiuni transversale până la 75 mm.

CARD poate analiza de asemenea concentratoare cilindrice sau prismatice ce sunt prevăzute cu multiple găuri ce se intersectează formând unghiuri de 90°. Însă, în cazul acestor concentratoare nu va putea fi determinată decât lungimea sau frecvența, factorul de amplificare și tensiunea neputând fi calculate.

Concentratoarele pot fi proiectate la frecvențe ce pornesc de la 5 KHz și care pot ajunge până la 90 KHz.

În urma proiectării pe baza relațiilor de calcul întocmită anterior, am obținut dimensiunile concentratoarelor pe care dorim să le folosim la aplicațiile de microinjectare a materialelor polimerice, respectiv injectare a pieselor cu pereți subțiri. Spre exemplificare, în continuare vom ilustra modalitatea în care se realizează calibrarea asistată de calculator a două elemente active ale sistemului ultrasonic, un concentrator cu rol de sculă de lucru, respectiv unul cu rol de corp reflector. Mai multe detalii despre rolul lor constructiv se găsesc în subcapitolul **4.1**. Deși forma lor exterioară este aproape identică, diferența dintre cele două componente este pusă în evidență de o secțiune longitudinală a lor.

Dimensionarea concentratorului adaptor de undă cilindric în trepte cu secțiune plină

Pasul 1. Introducerea coordonatelor geometrice ale punctelor care descriu forma geometrică a concentratorului și precizarea materialului din care este confecționat acesta (C45) (figura 3.14).

FILE	GRAPH	OPTION	EQUATION	HELP	ABOUT		
SURFACE	TYPE	X_END	DIAMETER	ANGLE	RADIUS	MATERIAL	M
8e	∅ Straight	77.00	15.00	0.00		OLC 45	
7e	∅ Arc	51.68	15.00		10.00	OLC 45	
6e	∅ Straight	42.00	30.00	-90.00		OLC 45	
5e	∅ Straight	42.00	50.00	0.00		OLC 45	
4e	∅ Straight	32.00	50.00	90.00		OLC 45	
3e	∅ Arc	32.00	30.00		5.00	OLC 45	
2e	∅ Straight	27.00	20.00	0.00		OLC 45	
1e	∅ Straight	0.00	20.00	90.00		OLC 45	
0e	-----	0.00	0.00	0.00		---	

FILE: User.Hrn	TITLE: Horn			
SURFACE: Exterior	CURRENT SURFACE = 8 of 8 (32 still available)			
F1 HELP	F2 GO TO INTERIOR	F3 SET REF	F4 DELETE 0	F5 FINISH
F6 EQN	F7 SCALE	F8 OTHER	F9 VIEW	F10 UNITS
F11 FLIP	ALT + FUNCTION KEY	FUNCTION KEY HELP		
← ENTER/EDIT SURFACE DATA	ESC EXIT	CHOICE =		

Fig.3.14. Fereastra de introducere a coordonatelor concentratorului cilindric în trepte

Pasul 2. Vizualizarea formei geometrice rezultate în urma introducerii coordonatelor, cu posibilitatea de identificare și corectare a eventualelor erori survenite la pasul anterior (figura 3.15).

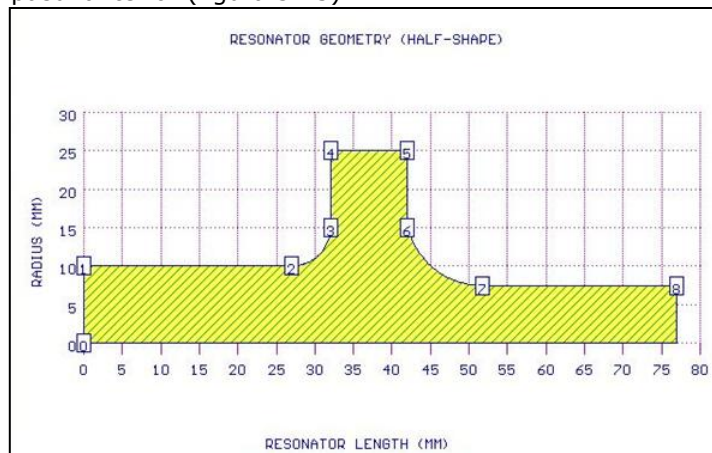


Fig. 3.15. Fereastra de vizualizare a formei concentratorului rezultat în urma introducerii coordonatelor

Pasul 3. Obținerea caracteristicilor tehnice ale concentratorului rezultate în urma calibrării acestuia de către program (lungimea concentratorului, frecvența de rezonanță la ieșirea din transductor, factorul de amplificare a amplitudinii, tensiunea de-a lungul secțiunii, punctul în care este situat nodul) (figura 3.16).

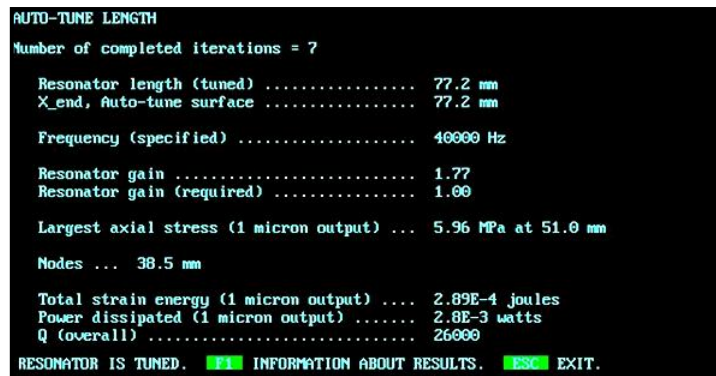


Fig.3.16. Caracteristicile tehnice ale concentratorului rezultate în urma calibrării

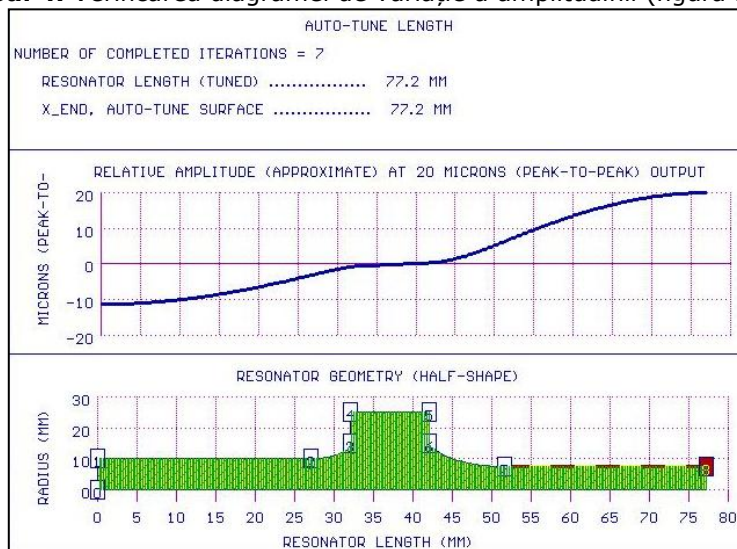
Pasul 4. Verificarea diagramei de variație a amplitudinii (figura 3.17).

Fig.3.17. Diagrama de variație a amplitudinii

S-a urmărit ca în zona flanșei (de care se va realiza prinderea), valoarea amplitudinii să fie 0 (zona de nod), iar în capătul concentratorului, amplitudinea să aibe valoarea maximă.

Pasul 5. Analiza diagramei de tensiune a concentratorului de-a lungul secțiunii sale longitudinale. În figura 3.18 sunt marcate zonele periculoase situate la nivelul modificărilor de secțiune, unde pot apărea secționări ale concentratorului la folosirea îndelungată datorate ruperii la oboseală.

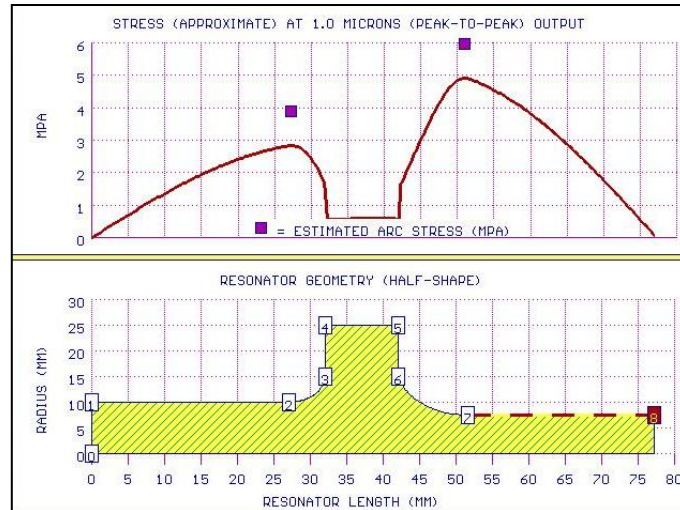


Fig.3.18. Diagrama de tensiune a concentratorului de-a lungul secțiunii sale longitudinale

Dimensionarea concentratorului adaptor de undă cilindric în trepte cu secțiune inelară (orificiu central)

La fel ca și în cazul dimensionării concentratorului cilindric în trepte cu secțiune plină, itinerariul de proiectare al concentratorului cilindric în trepte cu orificiu central va conține aceleași etape. Diferența constă în faptul că acesta din urmă are prevăzut un orificiu interior destinat injectării materialului plastic. Prezența acestui orificiu determină o calibrare suplimentară din partea programului.

Acest concentrator va juca un dublu rol în procesul activării ultrasonice a procesului de injectare:

- duză de injectare, ca element al mașinii de microinjectat;
- corp reflector, ca și componentă a ansamblului ultrasonic.

Pasul 1. Se introduc coordonatele punctelor care descriu forma geometrică interioară a concentratorului adaptor de undă (figura 3.19).

FILE	GRAPH	OPTION	EQUATION	HELP	ABOUT	
SURFACE	TYPE	X_END	DIAMETER	ANGLE	RADIUS	
5i	∅ Straight	66.00	0.00	-26.57		
4i	∅ Straight	61.00	5.00	0.00		
3i	∅ Straight	39.00	5.00	-45.00		
2i	∅ Straight	34.00	15.00	0.00		
1i	∅ Straight	0.00	15.00	90.00		
0i	-----	0.00	0.00	0.00		

FILE: User.Hrn	TITLE: Horn			
SURFACE: Interior	CURRENT SURFACE = 5 of 5 (35 still available)			
F1 HELP	F2 GO TO EXTERIOR	F3 SET REF	F4 DELETE 5	F5 FINISH
F6 EQN	F7 SCALE	F8 OTHER	F9 VIEW	F10 UNITS
F FLIP	ALT + FUNCTION KEY	FUNCTION KEY HELP		
ENTER/EDIT SURFACE DATA	ESC EXIT	CHOICE =		

Fig.3.19. Fereastra de introducere a coordonatelor care descriu geometria interioară a concentratorului

Pasul 2. Pentru verificarea corectitudinii cu care au fost introduse coordonatele, se consultă regulat fereastra de vizualizare a formei geometrice a concentratorului (figura 3.20). Această fereastră poate fi vizualizată după fiecare coordonată nou introdusă.

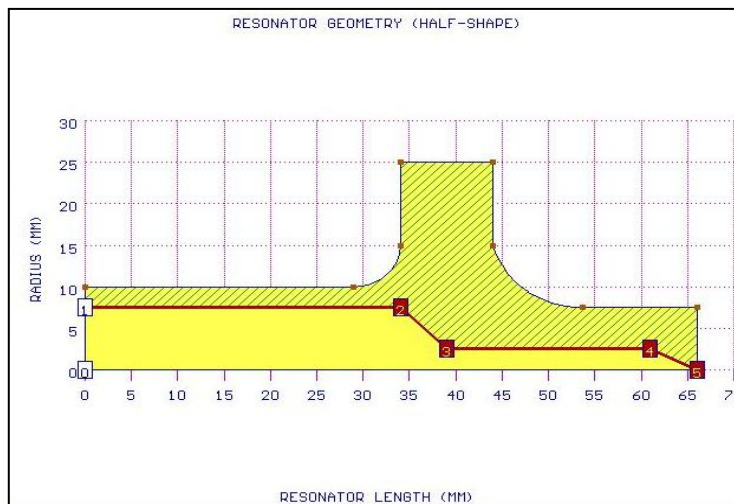


Fig.3.20. Fereastra de vizualizare a formei concentratorului

Pasul 3. După introducerea coordonatelor și verificarea corectitudinii formei geometrice a concentratorului adaptor de undă, se vor obține caracteristicile tehnice ale acestuia, rezultate în urma calibrării efectuate de către program (figura 3.21).

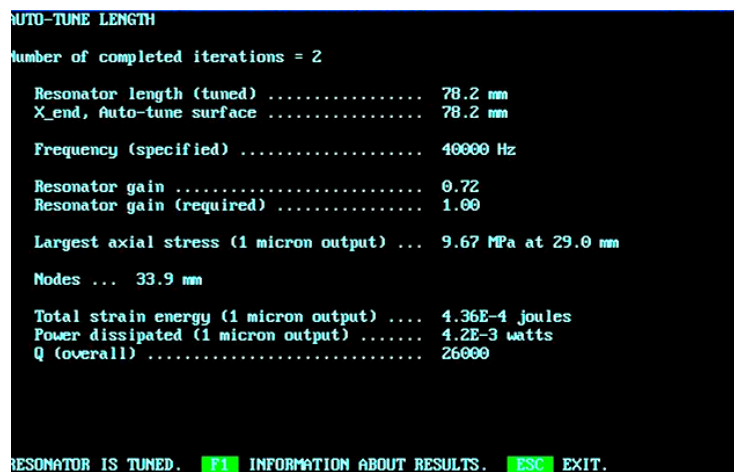


Fig.3.21. Caracteristicile tehnice ale concentratorului rezultate în urma calibrării

Pasul 4. În urma calibrării realizate de către program, a rezultat forma geometrică optimă a concentratorului, acest lucru putându-se observa în fereastra de variație a amplitudinii (figura 3.22).

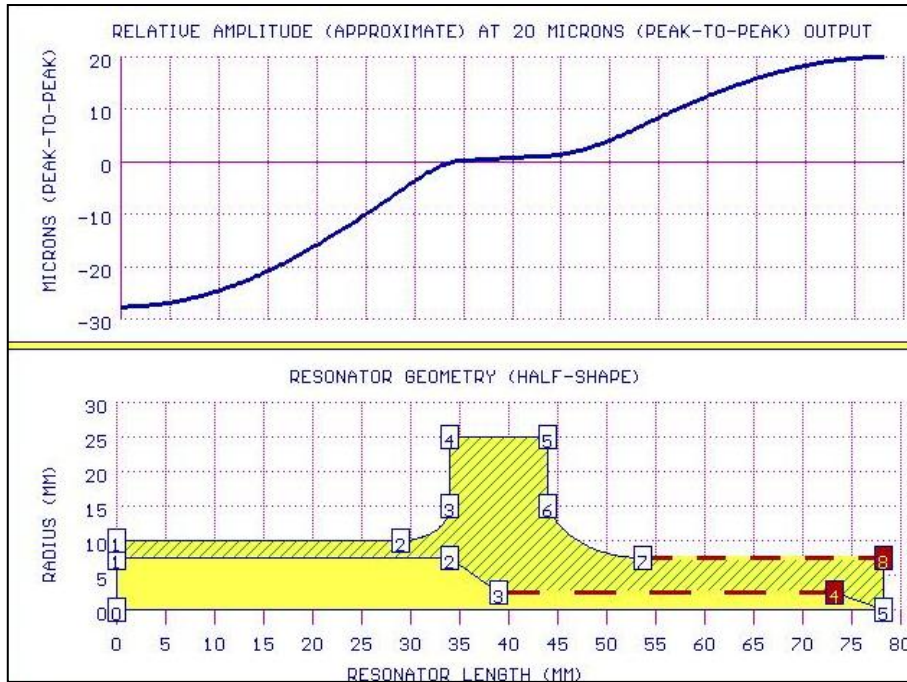


Fig.3.22. Diagrama de variație a amplitudinii

Pasul 5. Analiza diagramei de tensiune a concentratorului de-a lungul secțiunii sale longitudinale (figura 3.23).

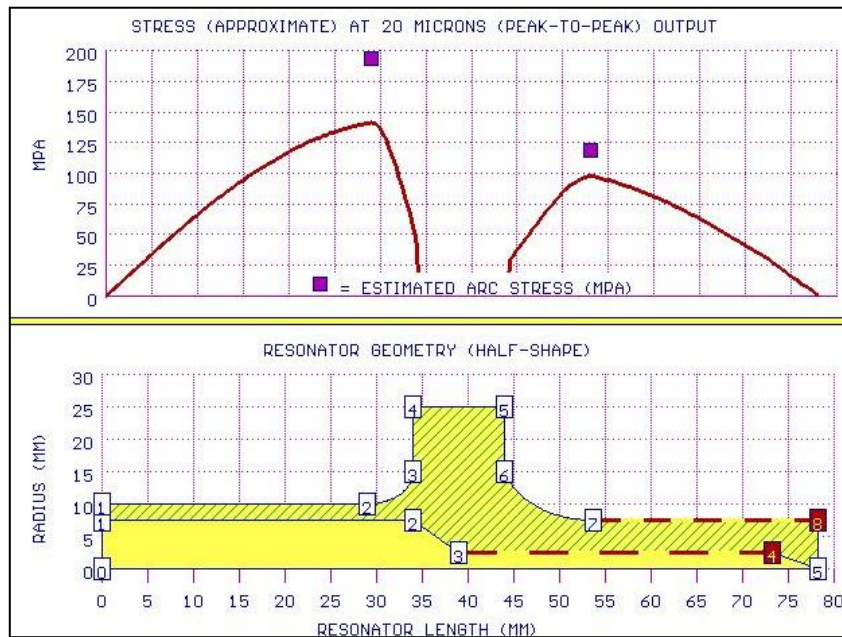


Fig.3.23. Diagrama de tensiune a concentratorului în lungul secțiunii sale longitudinale

Rezultatele obținute prin calibrarea cu ajutorul programului CARD au condus la obținerea dimensiunilor finale optime ale celor două concentratoare adaptoare de undă.

3.2.3. Realizarea documentației de execuție a elementelor ce alcătuiesc ansamblul ultrasonic

Pentru realizarea documentației de execuție a celor două concentratoare (scula de lucru, respectiv corpul reflector) și a transductorului ultrasonic s-a folosit programul de modelare 3D SolidWorks.

Desenul de execuție al concentratorului adaptor de undă cilindric în trepte cu secțiune plină

Acest concentrator, prezentat în figura 3.24, are rolul de a transmite în exteriorul sistemului ultrasonic energia mecanică primită, reprezentând elementul de legătură dintre transductor și mediul polimeric supus activării ultrasonice. Datorită formei sale geometrice, această componentă a sistemului ultrasonic contribuie la amplificarea amplitudinii oscilațiilor ultrasonice. Valoarea maximă a amplitudinii, conform diagramei de variație a acesteia, va fi în capătul concentratorului (zona de ventru), iar amplitudinea minimă în zona flanșei (zona de nod) de care se va realiza prinderea. Materialul din care se va executa concentratorul va fi oțelul C45.

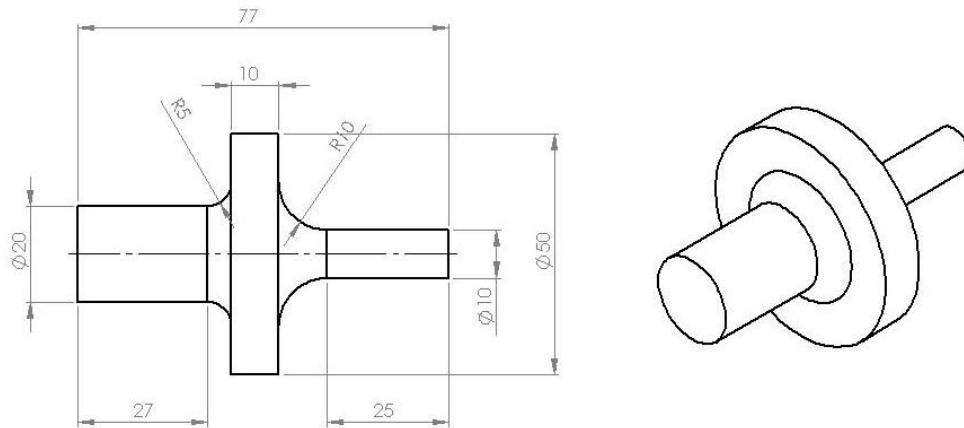


Fig.3.24. Concentrator adaptor de undă cilindric în trepte cu secțiune plină

Desenul de execuție al concentratorului adaptor de undă cilindric în trepte cu secțiune inelară (orificiu central)

Pe lângă rolul de amplificator de undă, acest concentrator (figura 3.25) mai îndeplinește funcția de interstițiu tehnologic impus de procesul de injectare, capătul activ al acestuia având o geometrie armonizată cu cea a duzei de injectare. Materialul din care este confecționat este, ca și în cazul precedent, oțelul C45.

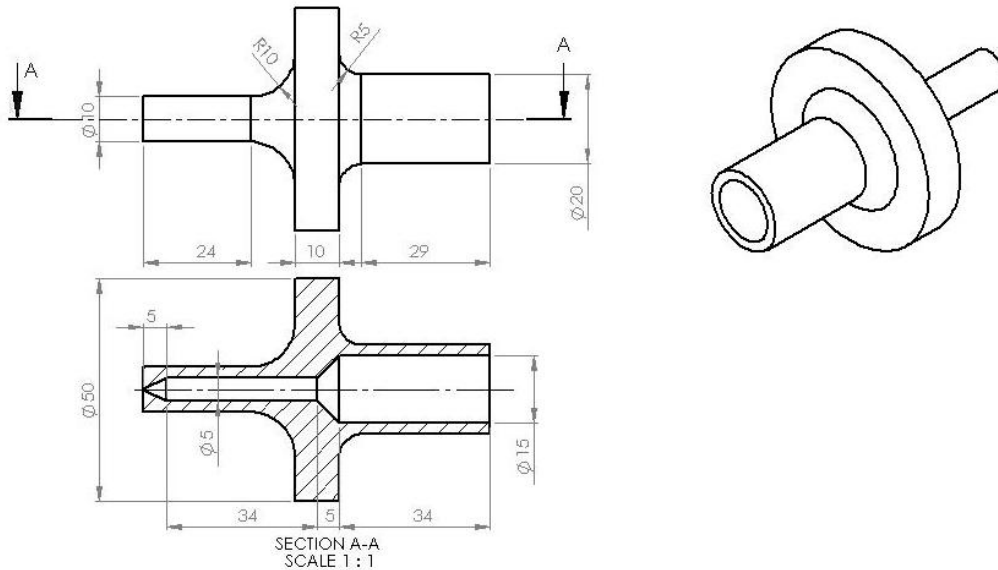


Fig.3.25. Concentrator adaptor de undă cilindric în trepte cu orificiu central (secțiune longitudinală)

3.2.4. Desenul de execuție al întregului convertor ultrasonic

Într-un sistem ultrasonic, părțile principale ale convertorului ultrasonic - transductorul și concentratoarele - trebuie să fie calculate astfel încât parametrii lor de funcționare să fie perfect corelați. Astfel, amplitudinea de oscilație a undelor ultrasonice la ieșirea din concentrator este dependentă, pentru un raport dat al secțiunilor, de amplitudinea furnizată de transductor (figura 3.26).

În funcție de dimensiunile transductorului și de elementele specifice procesului de utilizare (viteză și amplitudine de vibrație, arie de concentrare, mod de vibrație, etc.) se calculează parametrii concentratorului.

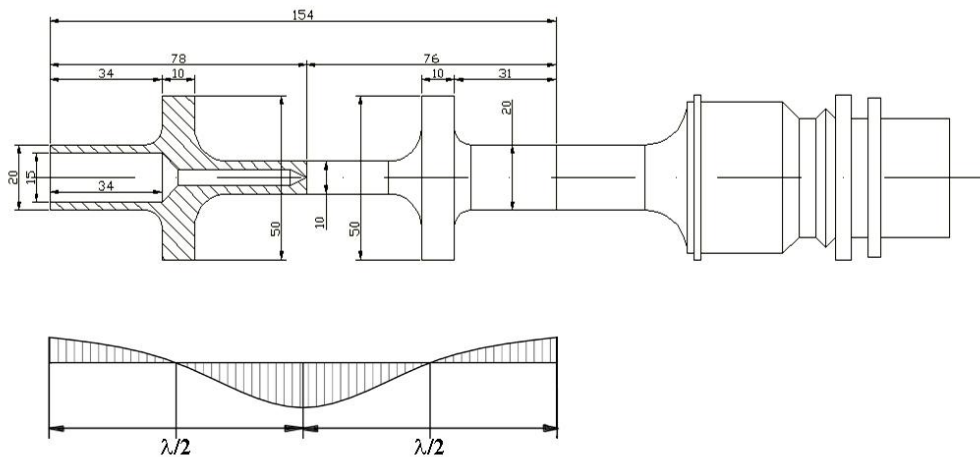


Fig.3.26. Ansamblu ultrasonic

3.3. Finalizarea proiectării concentratoarelor adaptoare de undă și testarea lor

3.3.1. Ajustarea finală a concentratoarelor adaptoare de undă

Dimensiunile concentratoarelor adaptoare de undă rezultate în urma proiectării realizate cu ajutorul programului CARD se apropie de valorile finale pe care ele trebuie să le aibă. Dar, pentru a fi siguri că acestea vor permite funcționarea ansamblului ultrasonic în regim de rezonanță, vom lăsa un adaos de prelucrare de câțiva milimetri. Dimensiunile finale ale concentratorului vor rezulta în urma efectuării unor teste de determinare a frecvenței ansamblului concentrator-transductor ultrasonic. Adaosul de prelucrare, lăsat ca element de siguranță, determină o scădere a frecvenței convertorului ultrasonic (transductor și generator) cu o valoare cuprinsă între 0,5 și 2 kHz. Aducerea convertorului la frecvența de lucru (40 kHz) se va face prin înlăturări succesive de straturi de material de pe fețele frontale ale concentratorului. După fiecare strat de material îndepărtat, se va verifica frecvența nou rezultată până la atingerea unei valori cât mai apropiate de 40 kHz.

Aparatura cu care vor fi testate concentratoarele este compusă dintr-un echipament de determinare a frecvenței și impedanței acustice (figura 3.27), un generator de semnal și un osciloscop, toate prezentate în subcapitolul 2.1.2.

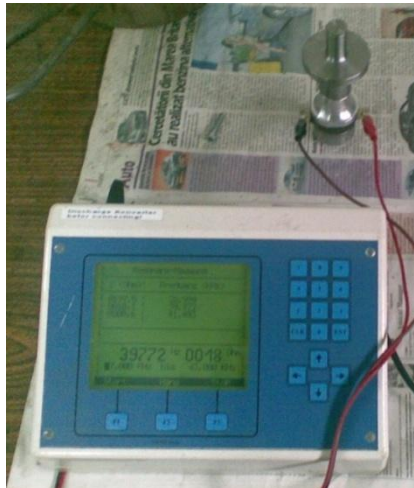


Fig. 3.27. Echipament de determinare a frecvenței și impedanței acustice pentru un convertor ultrasonic

În urma îndepărtării succesive a mai multor straturi de material, am obținut o frecvență a convertorului ultrasonic egală cu 39,772 kHz pentru o impedanță egală cu 51 Ω , după cum se poate vedea în figura 3.28.



Fig. 3.28. Determinarea frecvenței de rezonanță și a impedanței acustice a convertorului ultrasonic

3.3.2. Testarea unor caracteristici acustice ale concentratoarelor

Influența puterii generatorului ultrasonic asupra amplitudinii de oscilație a concentratorului

Așa cum s-a menționat în subcapitolul **2.1.1.1**, generatorul ultrasonic permite reglarea puterii pe care o introduce în sistem de la 15 la 150 W cu un increment de 1,5 W. Pentru a evidenția modul în care este influențată amplitudinea de oscilație la capătul activ al unui concentrator adaptor de undă, am măsurat valorile amplitudinii caracteristice pentru puteri majorate din 15 în 15 W. Amplitudinea a fost măsurată cu ajutorul unui aparat electronic de măsură descris la subcapitolul **2.1.2.3.**, obținându-se valorile prezentate în tabelul 3.3.

Variația amplitudinii de oscilație în funcție de puterea generatorului ultrasonic	
Putere generator US [W]	Amplitudine sonotroda [μm]
15	2
30	3
45	5
60	7
75	8
90	11
105	13
120	15
135	17
150	19

Tabelul 3.3. Variația amplitudinii de oscilație în funcție de puterea generatorului ultrasonic

Pe baza valorilor consemnate în tabelul 3.3 a rezultat graficul de dependență a amplitudinii concentratorului adaptor de undă de puterea introdusă în sistem de către generatorul ultrasonic, variație prezentată în figura 3.29.

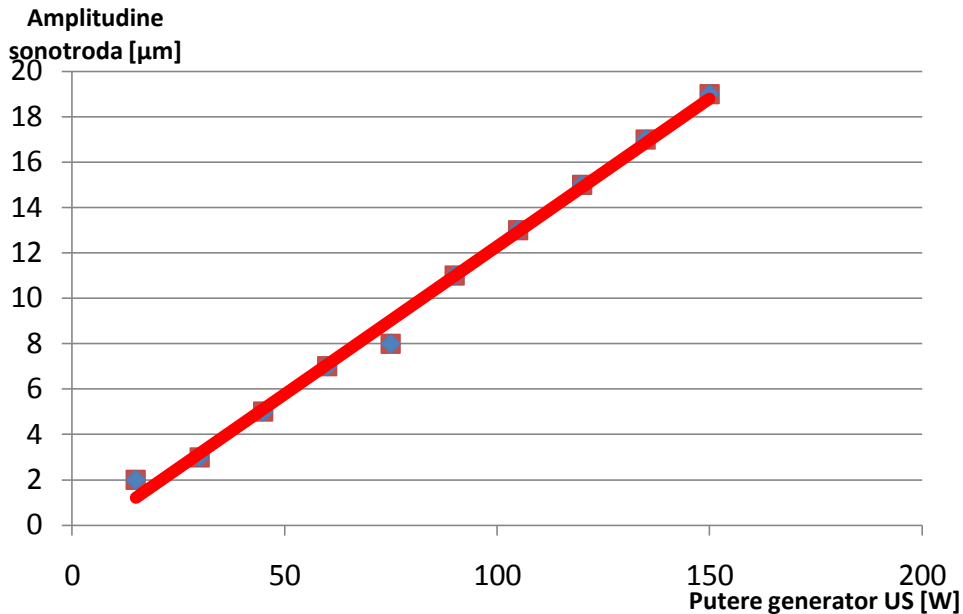


Fig. 3.29. Variația amplitudinii de oscilație în funcție de puterea generatorului ultrasonic

După cum se observă în figură, între cei doi parametri ai activării ultrasonice există un raport de proporționalitate directă, variația amplitudinii de oscilație în funcție de puterea generatorului fiind una liniară. Amplitudinile maxime de oscilație ale concentratorului vor fi obținute pentru valori mari ale puterii.

Influența duratei activării ultrasonice asupra temperaturii măsurate la capătul activ al concentratorului adaptor de undă

Activarea ultrasonică generează, pe lângă alte efecte, și un efect termic la interfața concentrator-material polimeric activat. Acest efect termic se evidențiază cel mai bine în zona capătului activ al concentratorului, unde amplitudinea de oscilație a undelor mecanice de frecvență ultrasonică are valorile cele mai mari. În acest subcapitol ne propunem să ilustrăm felul în care durata activării ultrasonice influențează temperatura în zona capătului activ al concentratorului. Pentru aceasta, s-a realizat montajul din figura 3.30 unde, cu scopul de a simula condițiile termice de lucru, încălzirea concentratorului s-a făcut prin intermediul unui generator de aer cald, temperatura fiind înregistrată cu ajutorul unui termometru infraroșu.



Fig. 3.30. Montaj experimental pentru studiul efectului termic al activării ultrasonice

Măsurarea temperaturilor s-a făcut începând de la o temperatură inițială a cărei valoare a crescut pentru fiecare set de experimente în parte (26°C, 30°C, 35°C, 40°C, 50°C). Activarea ultrasonică s-a făcut pe intervale de timp cuprinse între 0,25 și 1,95 secunde, durate de timp specifice unui ciclu de microinjectare.

Rezultatele experimentale obținute sunt prezentate în tabelele 3.4-3.8, interpretarea lor grafică făcându-se în figurile 3.31-3.35.

Timp activare [s]	Temperatura inițială [°C]	Temperatura finală [°C]	Diferență temperatură [°C]
0.25	26.2	26.6	0.4
0.3	25.9	27	1.1
0.35	26	27.2	1.2
0.4	26	27.3	1.3
0.45	26	27.7	1.7
0.5	26	27.9	1.9
0.55	26	27.8	1.8
0.6	26	28	2
0.65	26	28.3	2.3
0.7	26	28.6	2.6
0.75	26	28.6	2.6
0.8	26	28.6	2.6
0.85	26	28.8	2.8
0.9	26	29.2	3.2
0.95	26	29.3	3.3
1	26	32.1	6.1
1.05	26	30.1	4.1
1.1	26	30.1	4.1
1.15	26	30	4
1.2	26	30.7	4.7
1.25	26	30.5	4.5

Tabel 3.4. Rezultate experimentale pentru temperatura inițială de 26°C

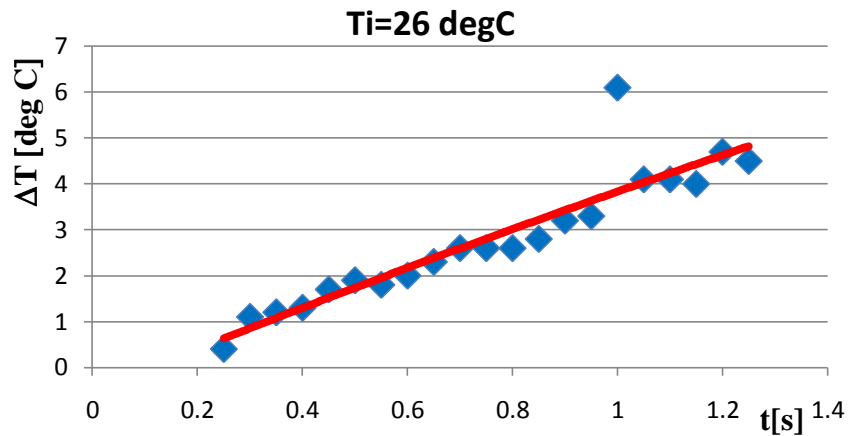


Fig. 3.31. Variația de temperatură la capătul activ al concentratorului în funcție de durata activării ultrasonice

Timp activare [s]	Temperatura inițială [°C]	Temperatura finală [°C]	Diferență temperatură [°C]
0.35	30	30.5	0.5
0.45	30	30.8	0.8
0.55	30	31.1	1.1
0.65	30	31.2	1.2
0.75	30	31.5	1.5
0.85	30	31.3	1.3
0.95	30	31.9	1.9
1.05	30	32.1	2.1
1.15	30	32.1	2.1
1.25	30	32.4	2.4
1.35	30	32.4	2.4
1.45	30	32.9	2.9
1.55	30	33.1	3.1
1.65	30	33.2	3.2
1.75	30	33.7	3.7
1.85	30	34.2	4.2
1.95	30	33.9	3.9

Tabelul 3.5. Rezultate experimentale pentru temperatura inițială de 30°C

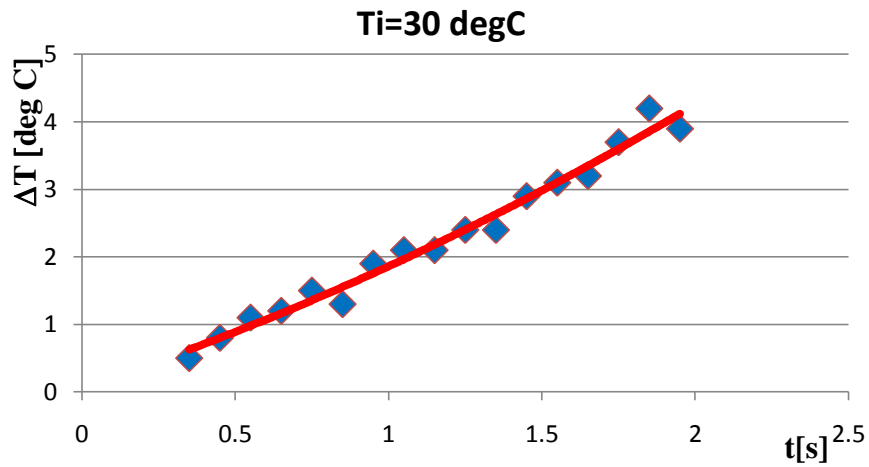


Fig. 3.32. Variația de temperatură la capătul activ al concentratorului în funcție de durata activării ultrasonice

Timp activare [s]	Temperatura inițială [°C]	Temperatura finală [°C]	Diferență temperatură [°C]
0.25	35	36.2	1.2
0.3	35	36.3	1.3
0.35	35	36.7	1.7
0.4	35	36.8	1.8
0.45	35	36.7	1.7
0.5	35	37	2
0.55	35	37	2
0.6	35	38	3
0.65	35	36.7	1.7
0.7	35	38	3
0.75	35	37.9	2.9
0.8	35	40.5	5.5
0.85	35	36.5	1.5

Tabel 3.6. Rezultate experimentale pentru temperatura inițială de 35°C

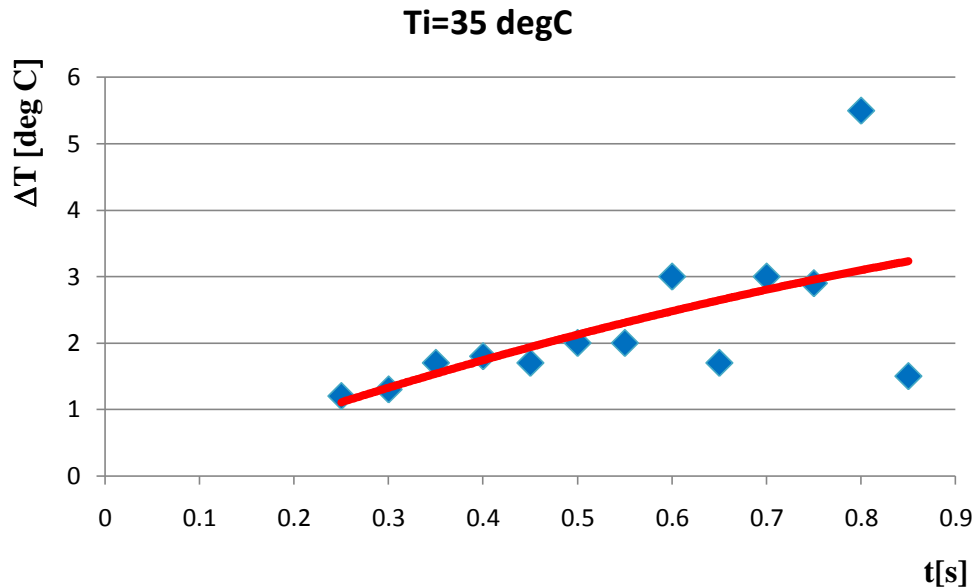


Fig. 3.33. Variația de temperatură la capătul activ al concentratorului în funcție de durata activării ultrasonice

Cu cât crește temperatura materialului, transferul energiei de la concentrator către mediul activat se face mai dificil, la un moment dat identificându-se chiar un fenomen de saturație ce poate provoca denaturări în sistem (dispersia punctelor măsurate prezentate în figura 3.33).

Timp activare [s]	Temperatura inițială [°C]	Temperatura finală [°C]	Diferență temperatură [°C]
0.35	40	40.4	0.4
0.45	40	40.6	0.6
0.55	40	40.3	0.3
0.65	40	40.9	0.9
0.75	40	40.7	0.7
0.85	40	41.2	1.2
0.95	40	41.1	1.1
1.05	40	41.8	1.8
1.15	40	41.8	1.8
1.25	40	41.9	1.9
1.35	40	42	2
1.45	40	42.5	2.5
1.55	40	43.3	3.3
1.65	40	42.8	2.8
1.75	40	43	3
1.85	40	43.1	3.1
1.95	40	44.3	4.3

Tabelul 3.7. Rezultate experimentale pentru temperatura inițială de 40°C

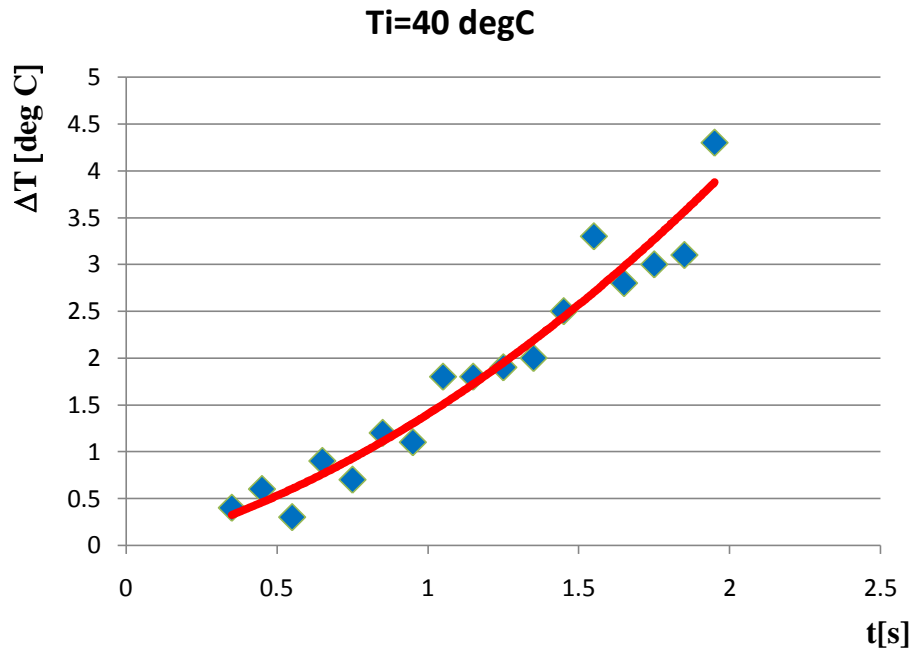


Fig. 3.34. Variația de temperatură la capătul activ al concentratorului în funcție de durata activării ultrasonice

Timp activare [s]	Temperatura inițială [°C]	Temperatura finală [°C]	Diferență temperatură [°C]
0.35	50	50.3	0.3
0.45	50	50.3	0.3
0.55	50	50.4	0.4
0.65	50	51.3	1.3
0.75	50	51.1	1.1
0.85	50	51.8	1.8
0.95	50	52	2
1.05	50	52.1	2.1
1.15	50	52.3	2.3
1.25	50	52.5	2.5
1.35	50	52.6	2.6
1.45	50	52.7	2.7
1.55	50	53	3
1.65	50	53.3	3.3
1.75	50	53.1	3.1
1.85	50	53.5	3.5
1.95	50	54.2	4.2

Tabelul 3.8. Rezultate experimentale pentru temperatura inițială de 50°C

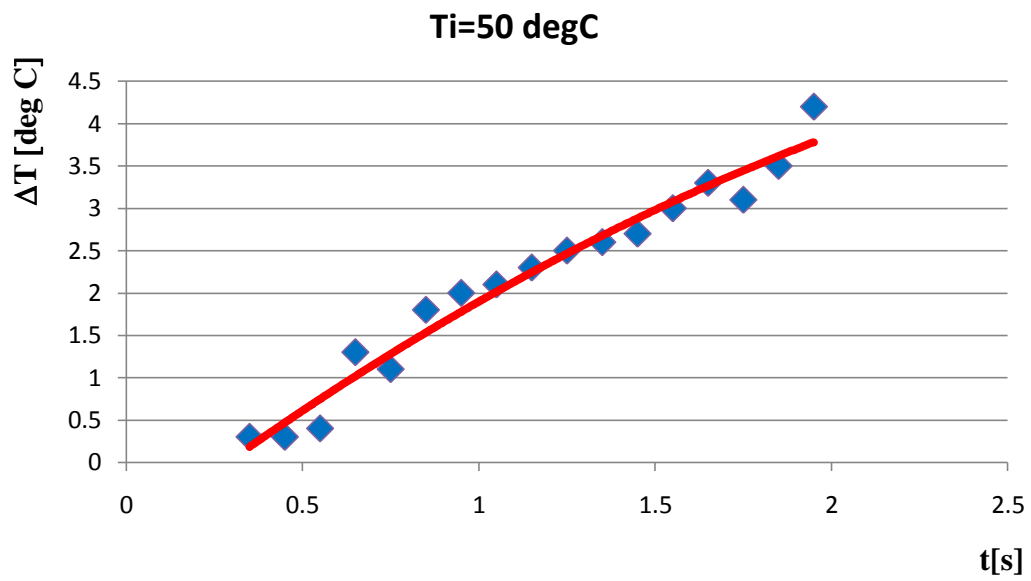


Fig. 3.35. Variația de temperatură la capătul activ al concentratorului în funcție de durata activării ultrasonice

4. STUDIUL PARAMETRILOR DE CURGERE AI INJECTĂRII MATERIALELOR POLIMERICE ACTIVATE ULTRASONIC LA FABRICAREA PIESELOR CU PEREȚI SUBȚIRI

4.1. Studiul curgerii materialului polimeric la injectarea pieselor cu pereți subțiri

4.1.1. Mașina de injectat materiale plastice

Studiul parametrilor de curgere la activarea ultrasonică a procedeelor de fabricare a pieselor din materiale polimerice cu pereți subțiri s-a făcut prin intermediul unei mașini de injectat DK Codim 200-600 Verticale, aflată în dotarea laboratorului departamentului TPCIM (Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique), mașină prezentată în figura 4.1.



Fig. 4.1. Mașină de injectat DK Codim 200-600 Verticale

Această mașină de construcție specială se caracterizează prin planul său de separație orizontal, deschiderea matriței făcându-se pe o direcție verticală. Principalele caracteristici tehnice ale mașinii sunt ilustrate în tabelul 4.1.

Mașină de injectat DK Codim 200-600 Verticale	
Producător	DK
Model	200-600
Unitate de închidere:	
Forța de închidere	200 kN
Platou port matriță	730 mm
Distanța dintre coloane	475 mm
Cursa de deschidere	475 mm
Cursa aruncătoarelor	110 mm
Lățimea minimă a matriței	220 mm
Grupul de injectare: 237 g (8.3 oz)	
Capacitate de lucru	600
Diametru melcului	42 mm
Raport L/D	26
Presiune de injectare	2000 bar
Deplasare volumică	319 cm ³
Masa maximă injectată	287 g
Viteza de rotație a melcului	300 tr/min

Tabel 4.1. Fișa tehnică a mașinii de injectat

Pentru o mai ușoară descriere a desfășurării procesului de injectare, ne vom folosi de reprezentarea schematică a mașinii de injectat din figura 4.2.

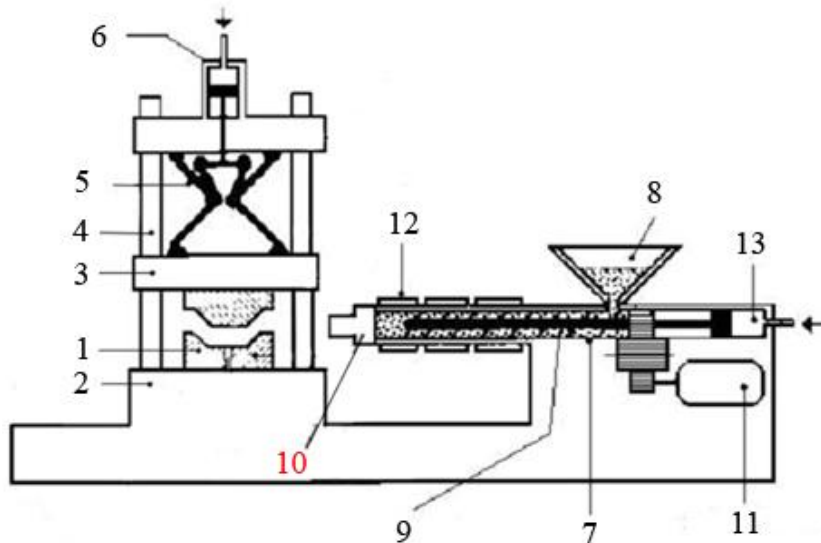


Fig. 4.2. Reprezentare schematică a mașinii de injectat

4.1. Studiul curgerii materialului polimeric la injectarea pieselor cu pereți subțiri 97

Matrița mașinii (1) este formată din două plăci, dintre care una solidară cu platoul fix (2), iar cealaltă cu platoul mobil (3). Cele două plăci ale matriței (placa port poanson, respectiv placa port cuib) sunt situate în planul vertical și presate cu o forță mare de închidere în momentul injectării. Evacuarea piesei injectate se realizează prin deplasarea platoului mobil pe coloanele de ghidare (4), deplasare posibilă datorită sistemului de pârghii cu genunchi (5) acționată de un piston hidraulic (6). În momentul în care platoul mobil ajunge la final de cursă are loc evacuarea piesei injectate din matriță prin acțiunea elementelor aruncătoare (tije subțiri care execută o mișcare pe o direcție verticală). Pentru a umple complet cavitățile matriței, eliminând astfel riscul apariției unor defecte ale pieselor injectate, platourile matriței sunt prevăzute cu rezistențe electrice care conferă un echilibru termic matriței. Imediat după umplerea cu material a cavităților matriței, își intră în rol sistemul de răcire compus din circuite parcurse de apă executate în corpul platoului fix.

Injectarea materialelor plastice reprezintă un proces ciclic care e alcătuit din mai multe operații, nedeterminate perfect în timp una față de alta:

- Plastifierea;
- Umplerea matriței;
- Compactarea;
- Răcirea matriței și evacuarea piesei injectate.

Un ciclu de injectare poate să dureze de la câteva secunde până la mai multe minute. Mașina de injectat permite delimitarea în timp a următoarelor sale operații: dozarea, injectarea, deschiderea, respectiv închiderea matriței, evacuarea piesei injectate.

Parametrii ajustabili cu ajutorul panoului de comandă cu care este dotată mașina sunt:

- Temperatura cilindrului de plastifiere;
- Temperatura matriței în timpul injectării;
- Presiunea cu care se face injectarea;
- Presiunea cu care se menține închisă matrița;
- Viteza de rotație a melcului;
- Cursa de dozare a melcului;
- Cursa de deschidere a matriței;
- Cursa aruncătoarelor.

Materialul plastic este introdus în cilindrul de injectare (7) sub formă de granule prin pâlnia (8). Odată ajuns în cilindrul de injectare, granulele de material sunt transportate cu ajutorul melcului de injectare (9) către vârful cilindrului, unde se găsește duza de injectare (10). Melcul execută în tot acest timp o mișcare de rotație generată de un sistem de angrenare (11). În timpul transportului lor spre duza de injectare, granulele polimerice se topesc datorită căldurii produse de rezistențele electrice externe (12) plasate de jur împrejurul cilindrului de injectare. La topirea lor mai contribuie și frecarea cu melcul de injectare pe care o execută în timpul fazei de dozare. Materialul polimeric topit este împins cu presiune în matriță de către melcul de injectare care execută acum o mișcare de translație longitudinală generată de sistemul de antrenare (13).

4.1.2. Duza reologică de injectare

De o atenție sporită se va bucura duza reologică de injectare (10) datorită rolului său de celulă de măsură a parametrilor fizici de curgere ai materialului polimeric topit în timpul procesului de injectare.

Forma sa specială, prezentată în figurile 4.3 (în vedere izometrică) și 4.4 (vedere în secțiune), permite găzduirea unei termocuple, a unui captor de presiune și a unor filiere capilare de diametre și lungimi variabile, având valori egale cu $\phi 0.3$ mm și $\phi 1$ mm respectiv 10 mm, 20 mm, 30 mm.

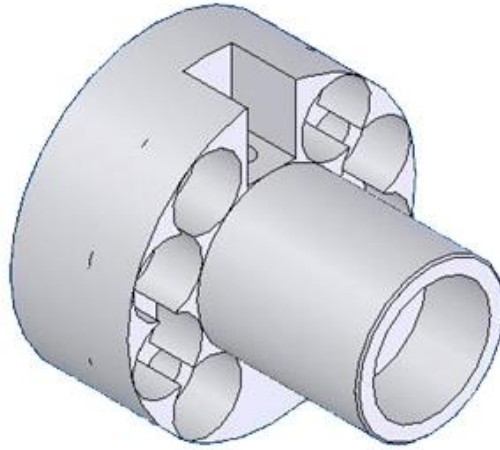


Fig.4.3. Duză reologică de injectare

Termocupla măsoară temperatura topiturii polimerice, permițând reglarea ei la valorile dorite pentru fiecare material injectat în parte. Captorul de presiune înregistrează presiunea de injectare a materialului din interiorul duzei pentru diferite regimuri de injectare. Filierile capilare de diametre diferite au rolul de a simula curgerea topiturilor polimerice la injectarea pieselor cu pereți subțiri, permițând astfel realizarea mai multor teste reologice. Ansamblul format din acești captori interni și externi este legat la un sistem electronic de achiziție a parametrilor înregistrați care se activează după depășirea unui prag de presiune de 50 de bari.

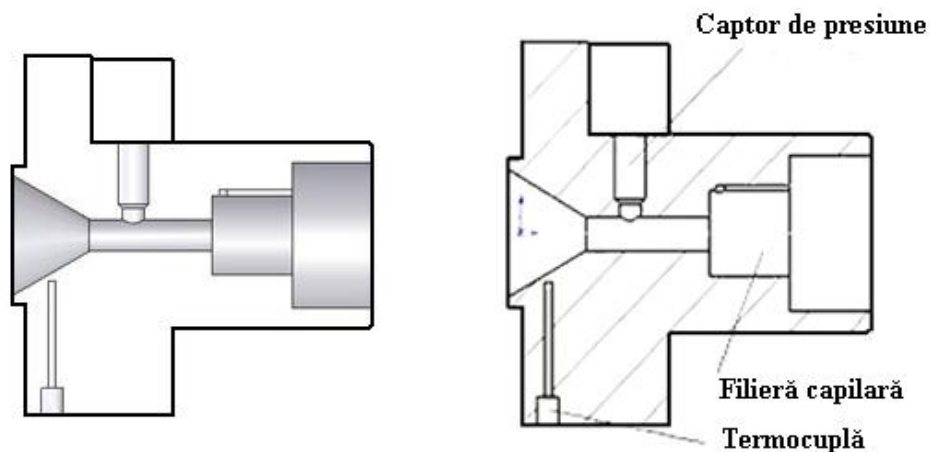


Fig.4.4. Vedere în secțiune a duzei reologice

4.2. Descrierea adaptărilor tehnologice realizate

Pentru a permite activarea ultrasonică a curgerii materialului polimeric topit, am fost nevoiți să modificăm forma constructivă inițială a duzei reologice (figura 4.5) de așa natură încât să poată permite montarea unui convertor ultrasonic (transductor + concentrator) (figura 4.6), fixat prin intermediul a trei, iar mai apoi a patru șuruburi M6. Concentratorul va intra astfel în contact direct cu materialul polimeric, transmițând și focalizând energia ultrasonică produsă de ansamblul generator - transductor ultrasonic. Orificiul prevăzut în duză, care permite ca sonotroda să intre în contact cu materialul polimeric, are un diametru mai mare decât diametrul d al secțiunii finale a concentratorului. Datorită faptului că amplitudinea de oscilație a concentratorului este de ordinul micronilor, este suficientă o diferență de câteva zeci de microni între diametrele orificiilor specificate mai sus. Dacă valorile celor două diametre ar fi fost foarte apropiate (montarea ar fi avut loc printr-un ajustaj cu strângere sau intermediar), energia ultrasonică nu ar mai fi ajuns în topitura polimerică, ci s-ar fi disipat în masa duzei, având loc în același timp inhibarea sistemului ultrasonic care n-ar mai fi funcționat în regim de rezonanță (toate calibrările efectuate în prealabil nemaifiind valabile).

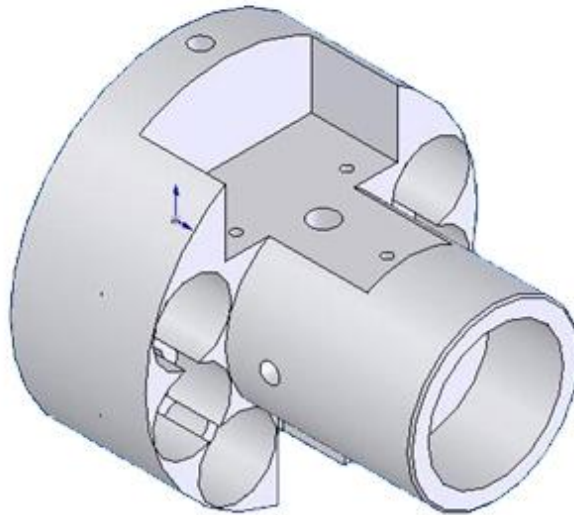


Fig. 4.5. Duză reologică modificată cu trei găuri de fixare

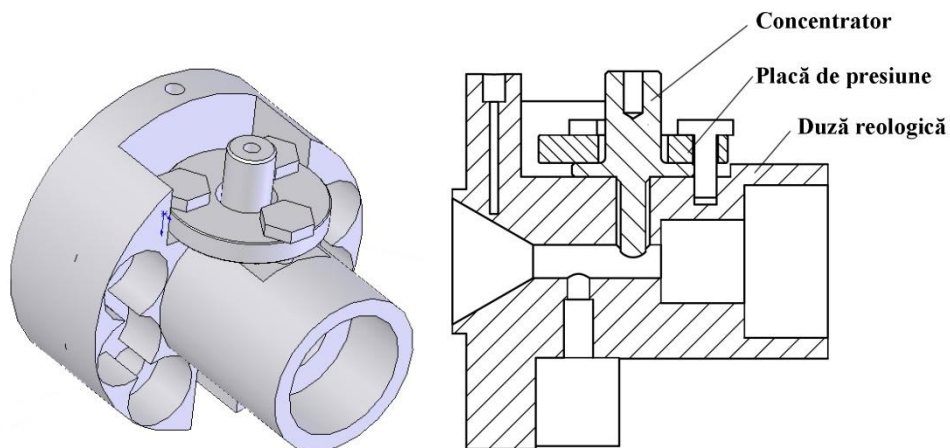


Fig. 4.6. Duză reologică modificată cu concentrator: vedere izometrică și în secțiune

Schimbarea modalității de fixare a sonotrodei de duză reologică, de la trei la patru găuri/șuruburi de prindere, a fost operată pentru a asigura o fixare mai riguroasă și o etanșeitate mai bună. În cazul primei modificări a duzei (cea cu trei găuri/șuruburi de prindere) s-au observat scurgeri de material la nivelul interfeței concentrator-duză atunci când s-a mărit viteza de injectare. Această variantă constructivă nu ne-ar fi permis să realizăm încercări experimentale decât pentru o paletă îngustă de viteze de injectare, fapt ce ne-a determinat să modificăm felul în care se face prinderea concentratorului. Pentru a asigura o mai bună planeitate a flanșei concentratorului în raport cu suprafața duzei, am proiectat și executat o altă duză reologică prevăzută cu patru găuri de prindere dispuse la 90° una față de cealaltă (figurile 4.7 și 4.8). O altă modificare adusă de această nouă duză a constat în absența plăcii de presiune, ea fiind înlocuită prin execuția unui concentrator prevăzut cu patru găuri simetrice în flanșa sa. Această modificare a determinat realizarea unei etanșeități excelente la interfața concentrator - orificiu al duzei, permițându-ne să injectăm la viteze mult superioare celor permise de construcția primei duze.

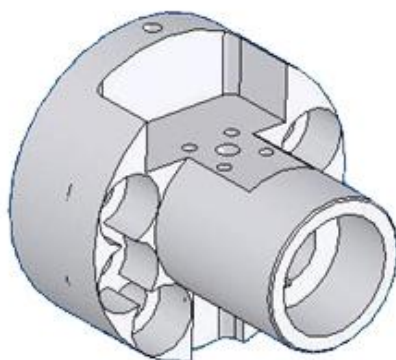


Fig. 4.7. Duză reologică modificată, cu patru găuri de fixare

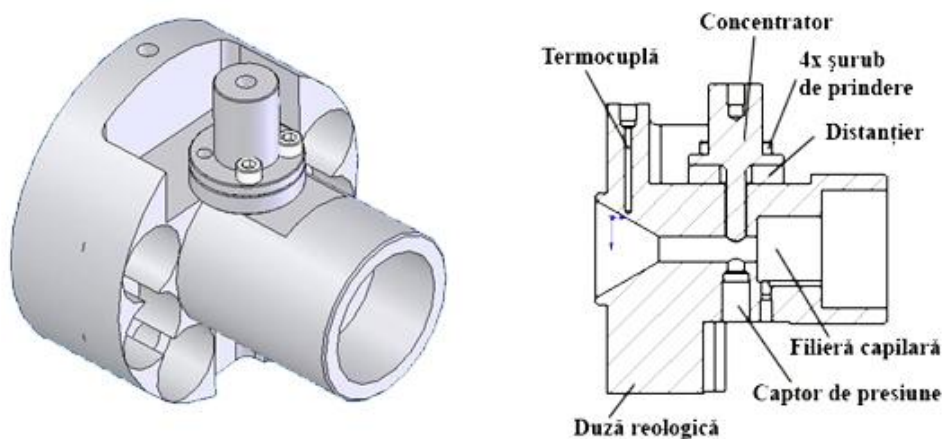


Fig. 4.8. Duză reologică modificată cu concentrator: vedere izometrică și în secțiune

Pentru a controla adâncimea la care se va imersa concentratorul în material s-au utilizat distanțiere metalice în formă de discuri de diferite grosimi, complementare cu dimensiunile flanșei concentratorului.

Montajul experimental final, format din duză reologică, concentrator adaptor de undă și transductor piezoceramic legat la sistemul de răcire cu aer comprimat și la generatorul ultrasonic, este prezentat în figura 4.9.

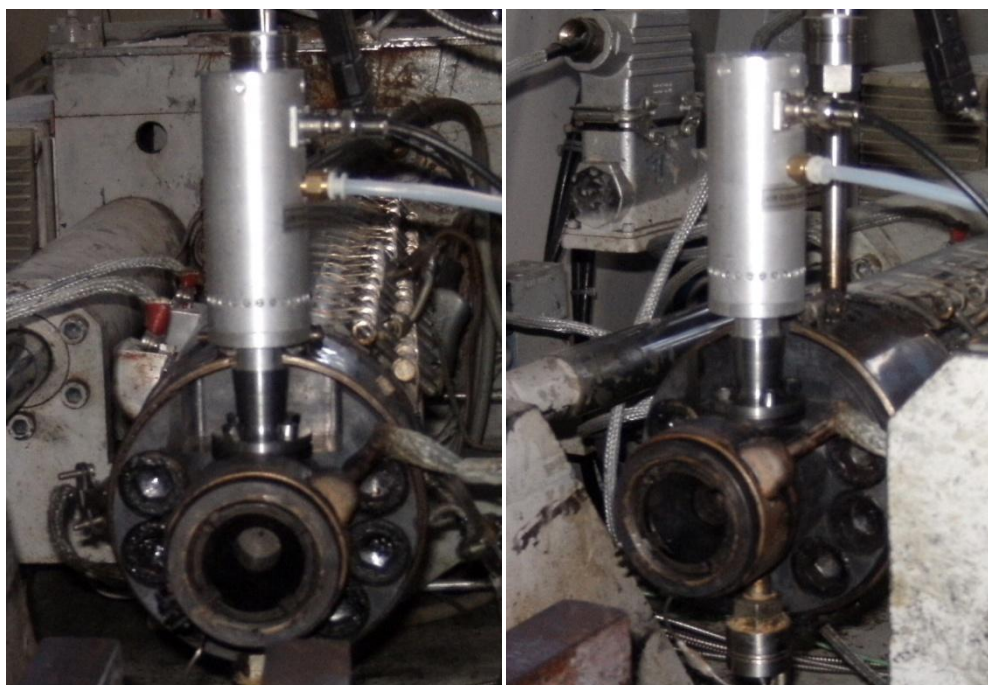


Fig. 4.9. Duză reologică cu convertor ultrasonic

4.3. Simularea comportamentului concentratorului

Datorită construcției platformei experimentale și a modului în care se realizează activarea ultrasonică (transversal față de direcția de curgere), concentratorul se află în contact cu topitura polimerică atât în timpul injectării propriu-zise, cât și între ciclurile de injectare. Din acest motiv temperatura lui este în permanență superioară unei valori de 200°C.

Știut fiind faptul că temperatura este unul dintre factorii care influențează frecvența de rezonanță a unui ansamblu ultrasonic, exista riscul ca proiectarea și calibrarea concentratorului efectuată atât cu programul CARD, cât și cu aparatura specifică de laborator realizate la temperatura ambiantă să nu mai fie valabile în condițiile specifice de lucru. Din acest motiv am simulat comportamentul acustic al concentratorului proiectat în **capitolul 3** la diferite temperaturi, încălzirea lui făcându-se cu ajutorul unui generator de aer cald Steinel HL 2010L. Frecvența de rezonanță a fost calculată cu ajutorul echipamentului de determinare a impedanței și a frecvenței de rezonanță prezentat în **subcapitolul 3.1.2.1**, iar temperatura a fost înregistrată de către un termometru infraroșu cu afișaj electronic, întregul montaj prezentat în figura 4.10.



Fig. 4.10. Determinarea frecvenței de rezonanță la diferite temperaturi

Valorile determinate în urma acestui experiment sunt expuse în tabelul 4.2.

Variația frecvenței de rezonanță a ansamblului ultrasonic în funcție de temperatură	
Temperatura [°C]	Frecvența de rezonanță [Hz]
18,5	40552
20	40560
25	40680
30	40545
35	40490
40	40425
45	40360
50	40310
55	40260
57	40240
60	40210
70	40140
90	40050
100	39830
140	39700

Tabelul 4.2. Variația frecvenței de rezonanță a ansamblului ultrasonic în funcție de temperatură

Pe baza valorilor din tabelul 4.2 s-a trasat graficul de dependență a frecvenței de rezonanță a convertorului ultrasonic în funcție de temperatură, prezentat în figura 4.11.

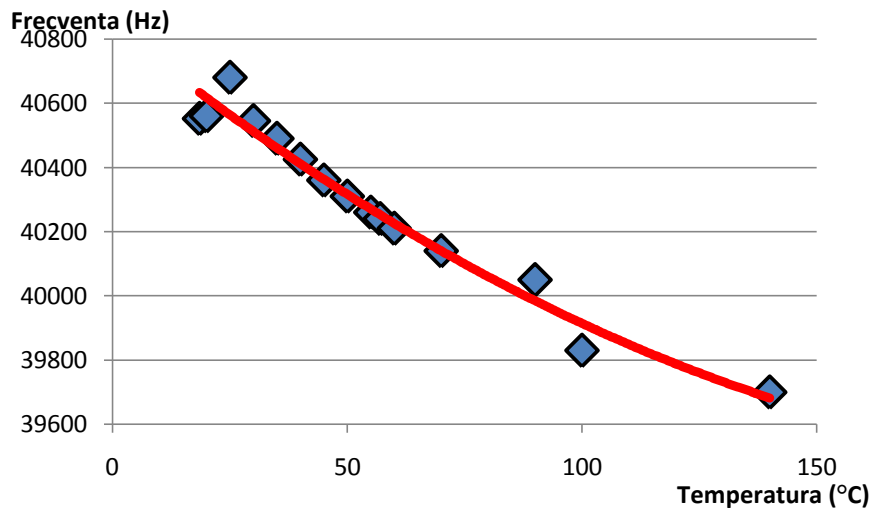


Fig.4.11. Variația frecvenței de rezonanță a ansamblului ultrasonic în funcție de temperatură

După cum se poate observa, cu cât temperatura crește, se înregistrează o scădere sensibilă a valorii frecvenței de rezonanță. Din fericire, această variație de frecvență se încadrează în limita permisă de generatorul ultrasonic, nemaifiind nevoie de o nouă calibrare a concentratorului. Funcționarea sistemului în regim de rezonanță a întregului ansamblu ultrasonic este astfel asigurată.

Răcirea transductorului ultrasonic cu aer comprimat suflat direct pe discurile piezoelectrice nu s-a dovedit a fi eficientă, fapt ce a determinat găsirea unei noi soluții de răcire a întregului sistem.

Pentru ca ansamblul ultrasonic să funcționeze în bune condiții și la temperaturi superioare valorii de 200°C, s-a impus utilizarea unui transductor piezoelectric de construcție specială, care are integrat în construcția sa un sistem de răcire (carcasă din aluminiu) pe bază de aer comprimat (figura 4.12). Astfel, este asigurată în permanență la nivelul discurilor piezoelectrice ce intră în componența concentratorului o temperatură inferioară punctului Curie, evitându-se astfel riscul apariției unor amortizări în ansamblului ultrasonic.



Fig. 4.12. Transductor piezoelectric cu sistem de răcire integrat și concentrator

4.4. Încercări pe mașina de injectat

Materialul injectat ales a fost polipropilena PP Polychim, un material cu bune proprietăți reologice, caracterizat printr-o temperatură de topire $T_t = 220^\circ\text{C}$ și un indice de fluiditate $\text{MFI} = 10\text{...}15$.

Pentru simularea injectării pieselor cu pereți subțiri, s-au utilizat filiere capilare de diferite diametre ($\phi 0,3\text{mm}$ și $\phi 1\text{mm}$) și lungimi (10 mm, 20 mm și 30 mm). Dimensiunile acestor filiere au influențat decisiv presiunea din interiorul duzei reologice, cele mai mari valori ale presiunii obținându-se cu filiere de diametru egal cu $\phi 0,3\text{mm}$.

Vitezele de injectare folosite au avut următoarele valori: $v=2\text{mm/s}$; $v=4\text{mm/s}$; $v=5\text{mm/s}$; $v=7\text{mm/s}$; $v=8\text{mm/s}$ și $v=10\text{mm/s}$. Pentru fiecare filieră utilizată, s-au efectuat câte șase cicluri de injectare corespunzătoare fiecărei viteze, trei dintre ele în prezența activării ultrasonice.

Pentru a mări sau diminua influența activării ultrasonice s-au utilizat două distanțiere metalice plasate între suprafața plană a duzei și flanșa sonotrodei.

Construcția duzei reologice a permis observarea și înregistrarea în timp real a parametrilor reologici în timpul procesului de injectare. De o importanță mărită s-au bucurat presiunea de injectare, temperatura în interiorul duzei și poziția melcului de injectare. Evoluția acestor parametri în timpul unui ciclu de injectare este reprezentată în figura 4.13.

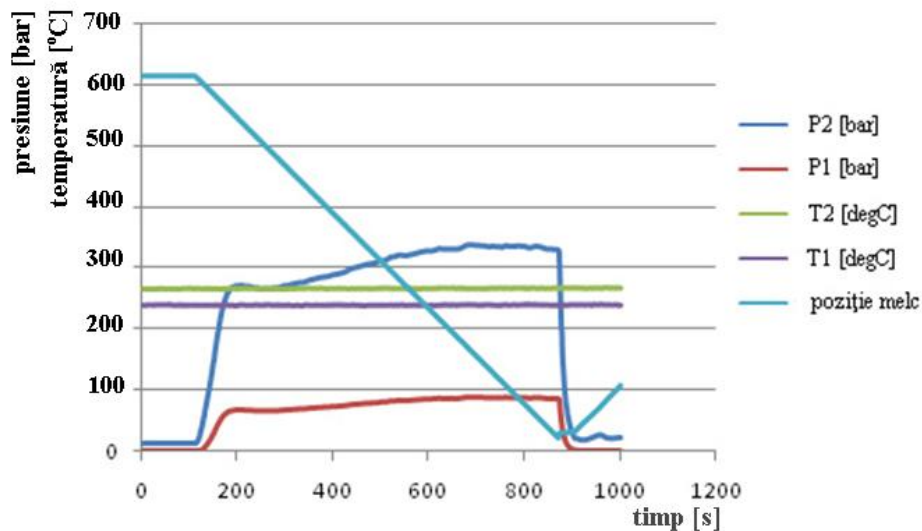


Fig.4.13. Parametri de injectare înregistrați pe parcursul unui ciclu de injectare

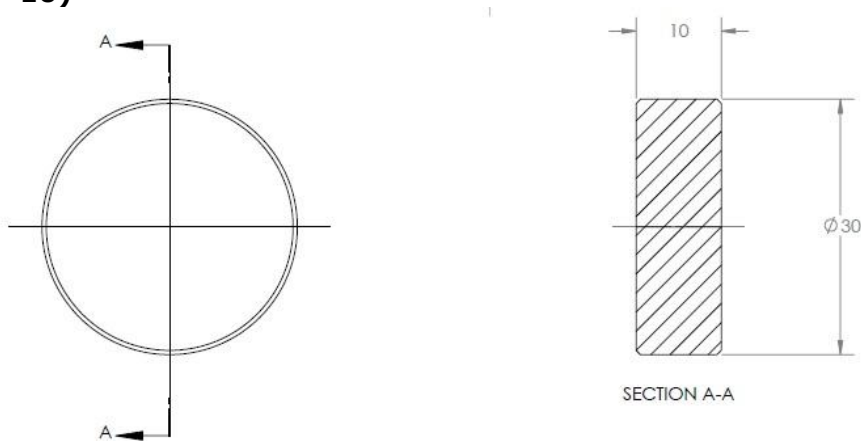
Plasarea a doi captori în două puncte diferite ale duzei ne-a permis o analiză mai minuțioasă a variațiilor de temperatură (T1 și T2) și presiune (P1 și P2).

4.4.1. Plan experimental pentru studiul parametrilor de proces la injectarea pieselor cu pereți subțiri

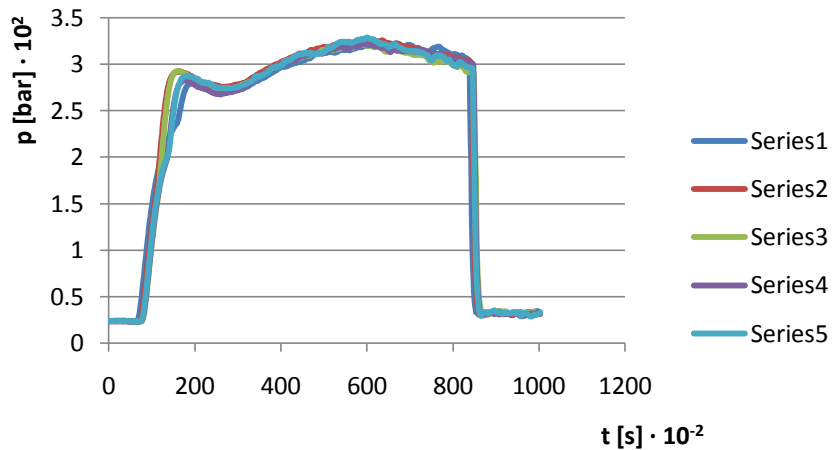
Diamteru Φ [mm]	Lungime filieră [mm]	Viteza de injectare [mm/s]	Activare US (da=1, nu=0)	Presiune [bar]	Temperatură [°C]
1	10	2	0	328.71	230 ± 3
1	10	4	0	307.01	
1	10	5	0	375.45	
1	10	7	0	499.88	
1	10	8	0	514.43	
1	10	10	0	578.73	
1	20	2	0	242.91	
1	20	4	0	285.28	
1	20	5	0	307.5	
1	20	7	0	423.83	
1	20	8	0	439.58	
1	20	10	0	414.53	
1	30	2	0	400.58	
1	30	4	0	505.93	
1	30	5	0	499.9	
1	30	7	0	487.81	
1	30	8	0	532.75	
1	30	10	0	610.92	
0,3	10	2	0	291.2	
0,3	10	4	0	400.63	
0,3	10	5	0	402.06	
0,3	10	7	0	519.86	
0,3	10	8	0	563.27	
0,3	10	10	0	675.02	
0,3	20	2	0	609.27	
0,3	20	4	0	706.9	
1	10	2	1	328.71	
1	10	4	1	267.54	
1	10	5	1	335.37	
1	10	7	1	479.8	
1	10	8	1	491.26	
1	10	10	1	561.71	
1	20	2	1	225.88	
1	20	4	1	265.9	
1	20	5	1	306.58	
1	20	7	1	379.46	
1	20	8	1	402.8	
1	20	10	1	382.51	
1	30	2	1	400.58	
1	30	4	1	505.93	
1	30	5	1	469.85	
1	30	7	1	432.83	
1	30	8	1	494.85	
1	30	10	1	580.63	
0,3	10	2	1	275.48	
0,3	10	4	1	400.63	
0,3	10	5	1	377.03	
0,3	10	7	1	484.86	
0,3	10	8	1	538.63	
0,3	10	10	1	627.57	
0,3	20	2	1	574.43	
0,3	20	4	1	662.07	

Tabel 4.3. Planul experimental

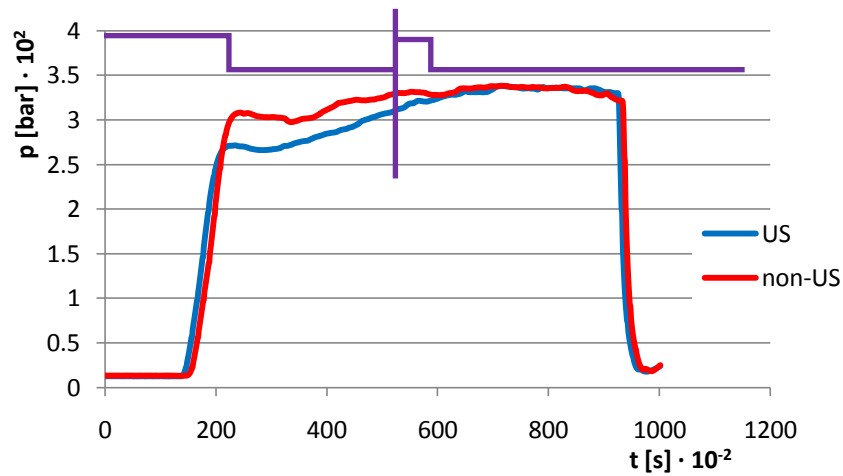
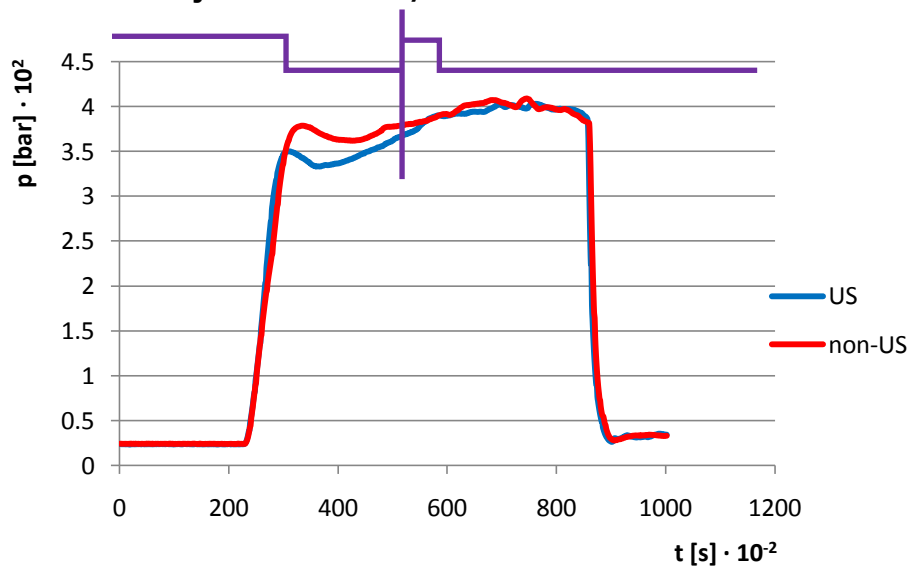
4.4.2. Injectări cu filiera de $\phi 1$ mm de lungime 10 mm (raport $L/\phi = 10$)

Fig. 4.14. Filieră de $\phi=1$ mm și $L=10$ mm

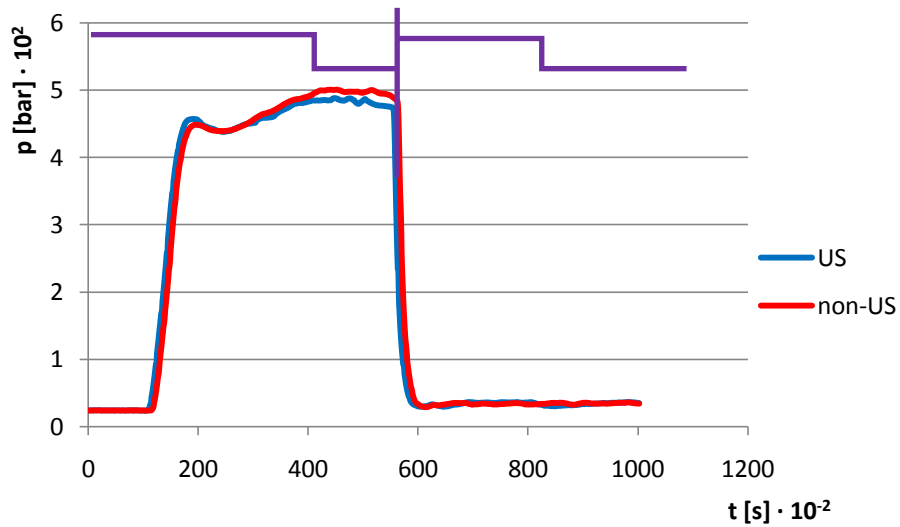
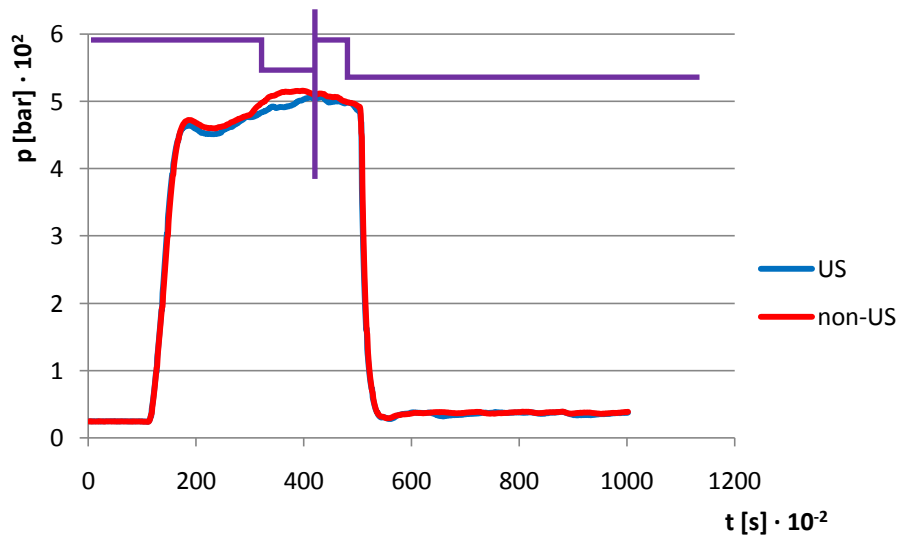
Viteză de injectare $v=2$ mm/s

Fig. 4.15. $\phi=1$ mm, $L=10$ mm, $v=2$ mm/s

Pentru o viteză de injectare egală cu 2 mm/s (cea mai mică viteză pe care o permite mașina de injectat) influența activării ultrasonice rămâne insesizabilă. După cum se poate observa în figura 4.15, profilurile tuturor presiunilor sunt sensibil egale indiferent dacă a avut loc sau nu activarea ultrasonice a curgerii. Începând de la această viteză, presiunea de injectare înregistrată în timpul activării ultrasonice prezintă o ușoară diminuare comparativ cu valoarea ei în cazul absenței activării. Pentru a pune în evidență mai ușor acest aspect am comparat mediile aritmetice ale valorilor presiunilor obținute în cazul activării ultrasonice (culoare albastră) cu cele ale presiunilor înregistrate la injectările clasice, în absența energiei ultrasonice (culoare roșie). Momentul în care începe, respectiv ia sfârșit activarea ultrasonice este marcat cu violet.

Viteză de injectare $v=4$ mm/sFig. 4.16. $\phi=1$ mm, $L=10$ mm, $v=4$ mm/s**Viteză de injectare $v=5$ mm/s**Fig. 4.17. $\phi=1$ mm, $L=10$ mm, $v=5$ mm/s

Pentru aceste două viteze de injectare (4 mm/s – figura 4.16 respectiv 5 mm/s – figura 4.17), activarea ultrasonică a produs o diminuare a presiunii din interiorul duzei reologice de aproximativ 40 de bari, reprezentând o scădere cu aproximativ 15% din valoarea inițială.

Viteză de injecție $v=7$ mm/sFig. 4.18. $\phi=1$ mm, $L=10$ mm, $v=7$ mm/s**Viteză de injecție $v=8$ mm/s**Fig. 4.19. $\phi=1$ mm, $L=10$ mm, $v=8$ mm/s

În cazul injectărilor care au avut loc cu viteze de 7 mm/s (figura 4.18), 8 mm/s (figura 4.19) și 10 mm/s (figura 4.20), reducerile de presiune înregistrate au fost de aproximativ 20 de bari, diferențe ce reprezintă în jur de 5% din valoarea obținută în absența activării ultrasonice.

Viteză de injectare $v=10$ mm/s

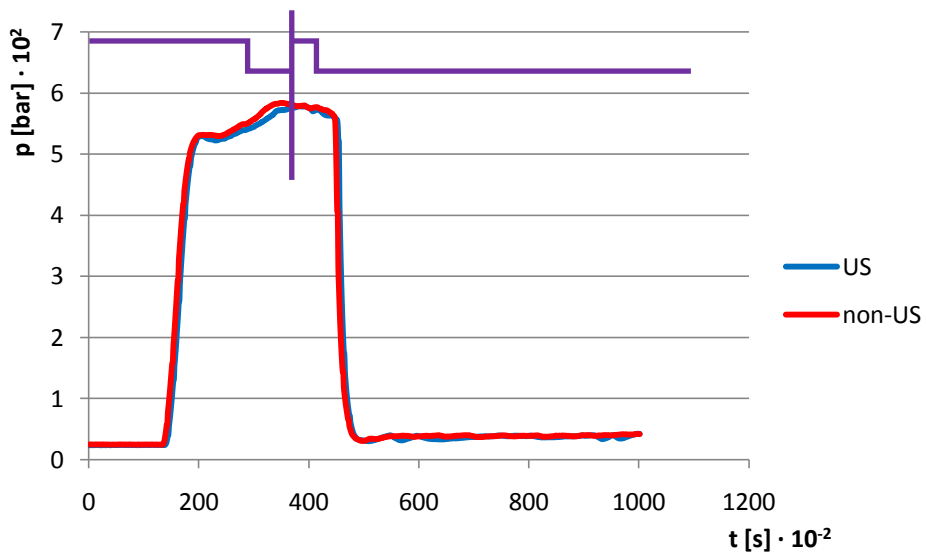


Fig. 4.20. $\phi=1$ mm, $L=10$ mm, $v=10$ mm/s

4.4.3. Injecții cu filiera de $\phi 1$ mm de lungime 20 mm (raport $L/\phi = 20$)

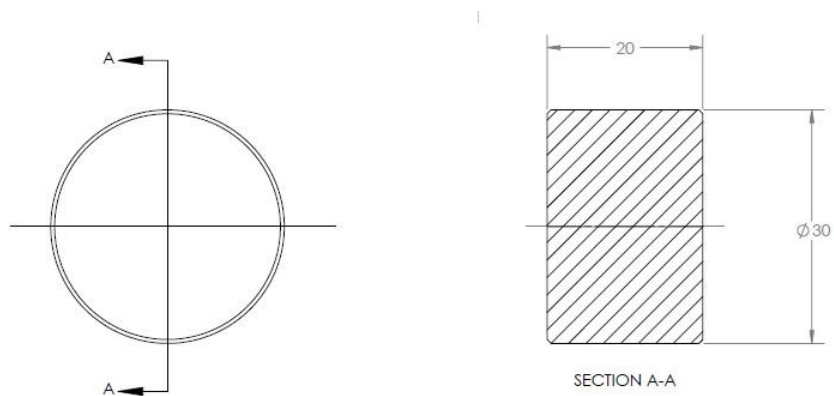
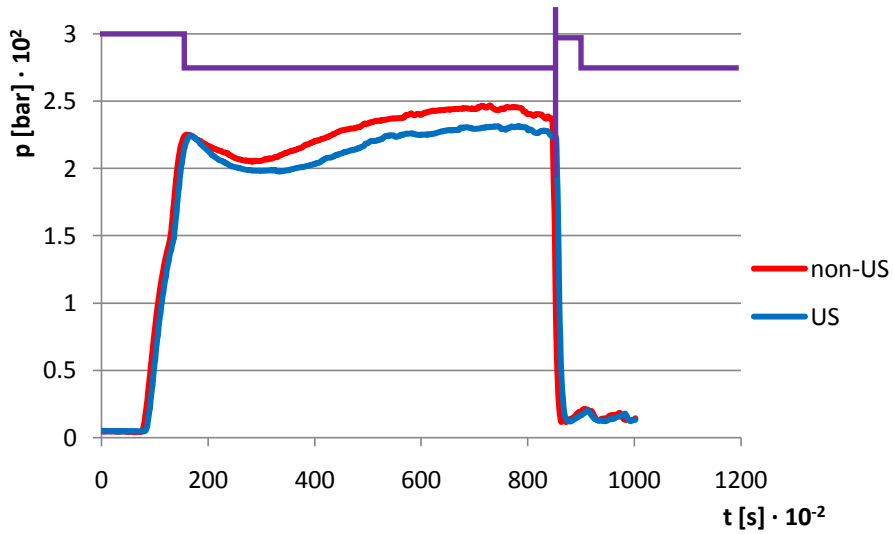
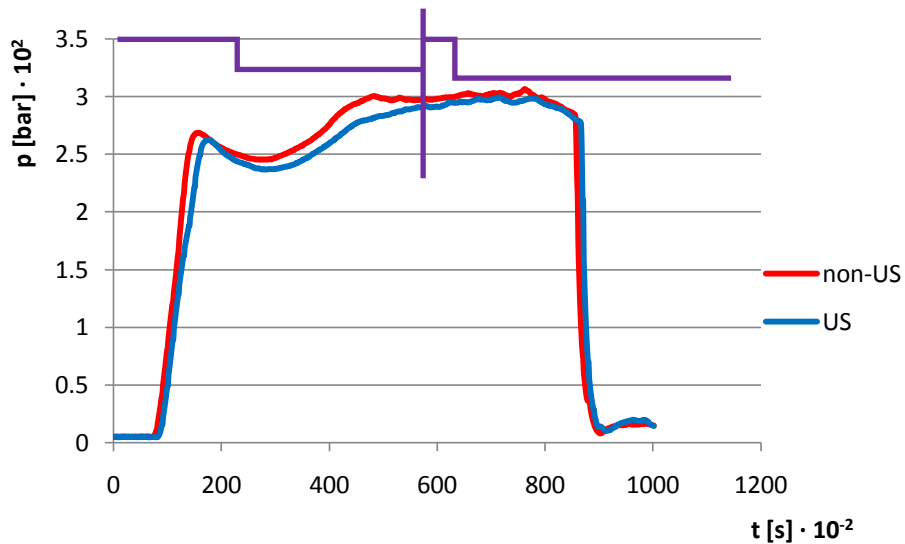
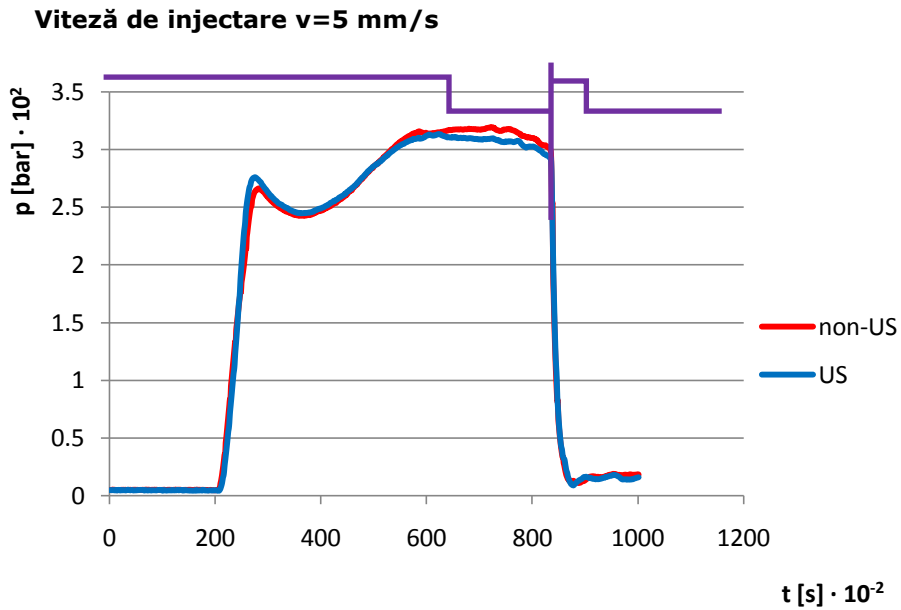


Fig. 4.21. Filieră de $\phi=1$ mm și $L=20$ mm

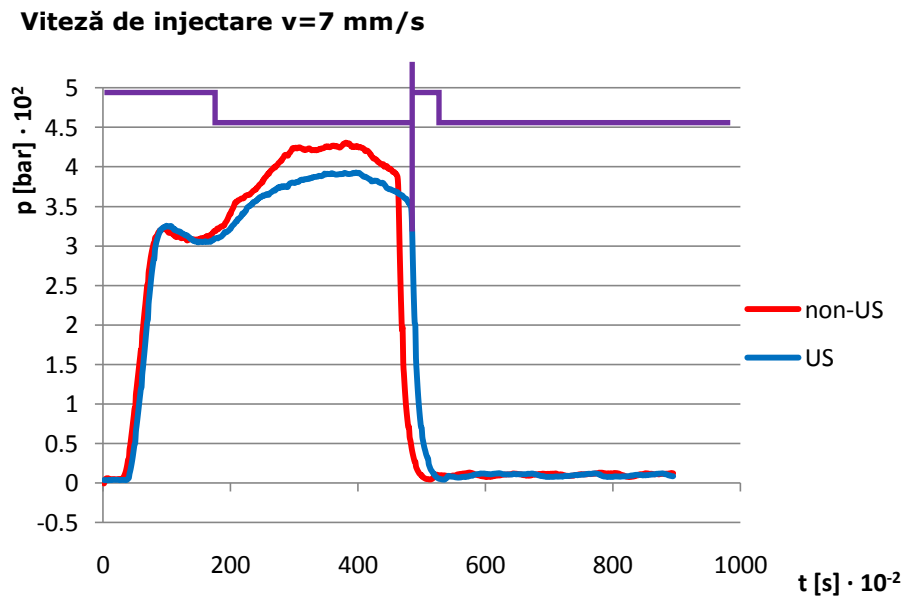
Viteză de injectare $v=2$ mm/sFig. 4.22. $\phi=1$ mm, $L=20$ mm, $v=2$ mm/s

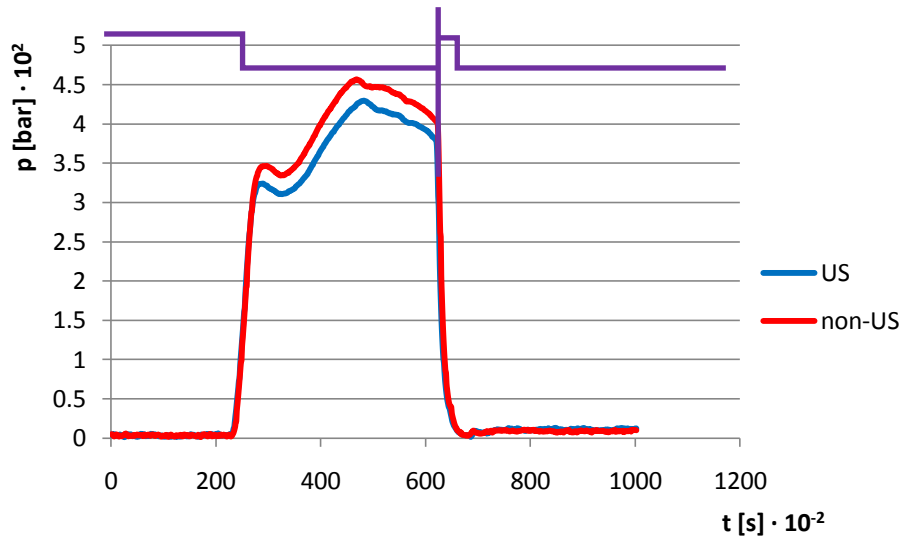
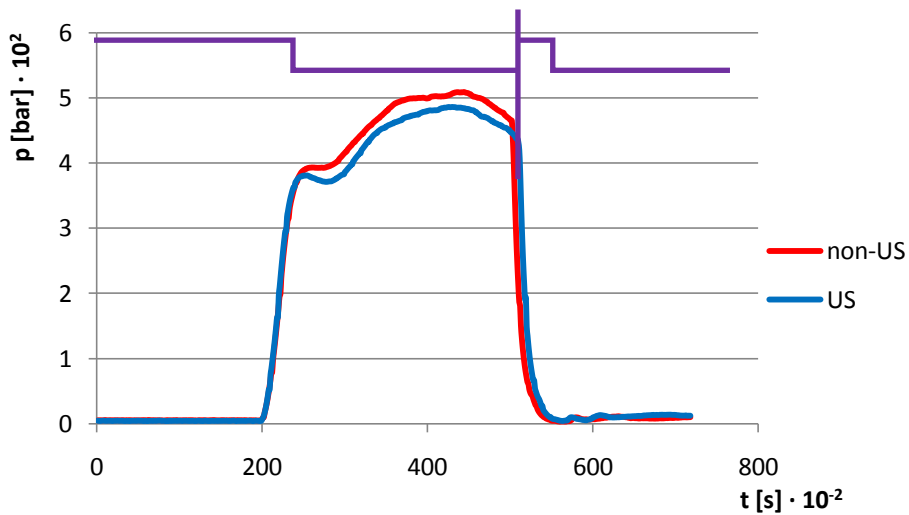
Diferența de presiune înregistrată pe parcursul activării ultrasonice este de 30 de bari în cazul injectărilor cu viteze de 2 mm/s (figura 4.22), respectiv 20 de bari pentru viteze de injectare egale cu 4 mm/s (figura 4.23).

Viteză de injectare $v=4$ mm/sFig. 4.23. $\phi=1$ mm, $L=20$ mm, $v=4$ mm/s

Fig. 4.24. $\phi=1$ mm, $L=20$ mm, $v=5$ mm/s

Acțiunea energiei ultrasonice asupra curgerii polipropilenei la injectarea cu viteze de 5 mm/s produce o scădere a presiunii cu 10 bari în intervalul de timp în care a avut loc activarea (figura 4.24). Pentru o viteză de 7 mm/s, diferențele sunt mult mai pronunțate: o diminuare de 45 de bari, ceea ce reprezintă peste 10% din valoarea presiunii înregistrate în absența activării ultrasonice (figura 4.25).

Fig. 4.25. $\phi=1$ mm, $L=20$ mm, $v=7$ mm/s

Viteză de injectare $v=8$ mm/sFig. 4.26. $\phi=1$ mm, $L=20$ mm, $v=8$ mm/s**Viteză de injectare $v=10$ mm/s**Fig. 4.27. $\phi=1$ mm, $L=20$ mm, $v=10$ mm/s

Pentru ultimele două viteze de injectare utilizate (8 mm/s respectiv 10 mm/s), rezultatele obținute au fost relativ asemănătoare: o scădere de 37 de bari în cazul primei viteze (figura 4.26), respectiv de 32 pentru cea de-a doua (figura 4.27), ceea ce reprezintă procentual diminuări de aproximativ 7%.

4.4.4. Injectări cu filiera de $\phi 1\text{mm}$ de lungime 30mm (raport $L/\phi = 30$)

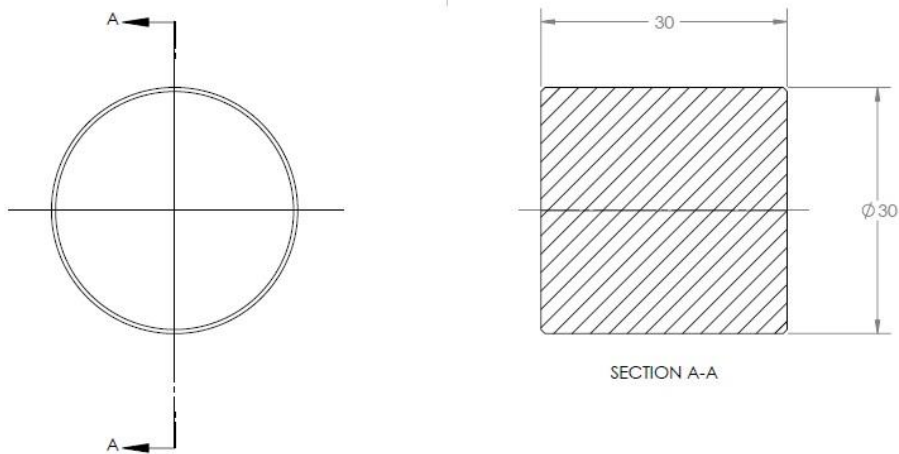


Fig. 4.28. Filieră de $\phi=1\text{mm}$ și $L=30\text{mm}$

Viteză de injectare $v=2\text{ mm/s}$

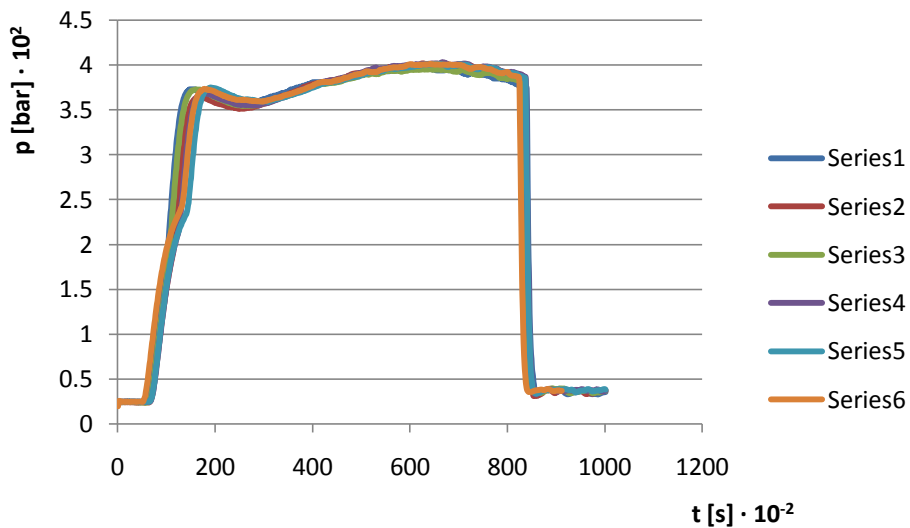
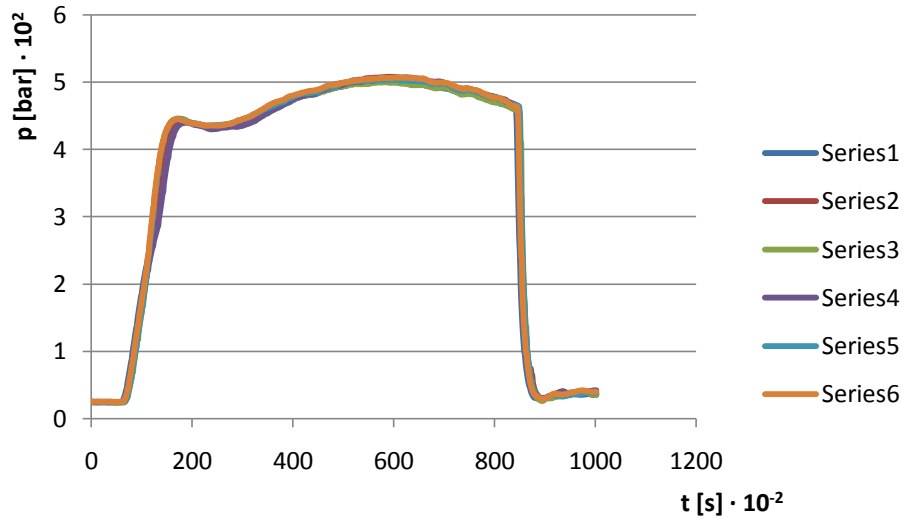
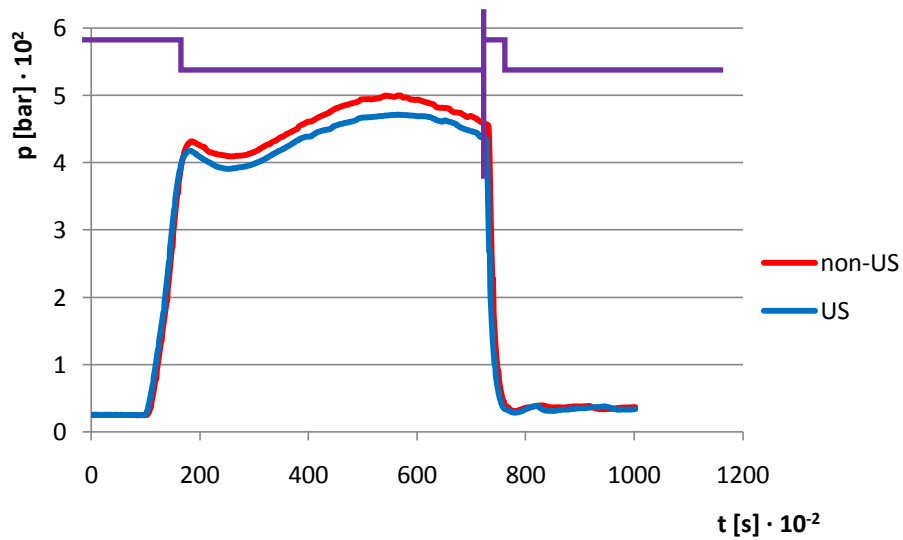
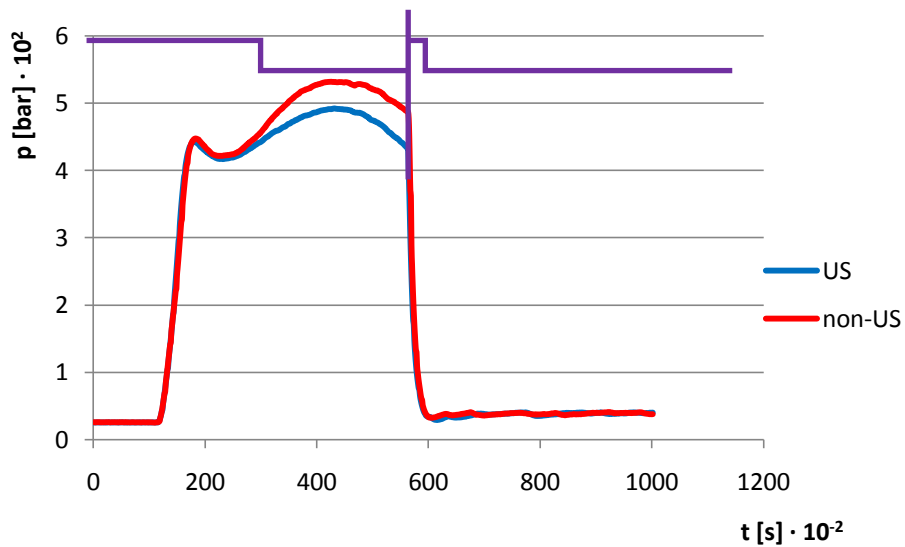


Fig. 4.29. $\phi=1\text{mm}$, $L=30\text{mm}$, $v=2\text{mm/s}$

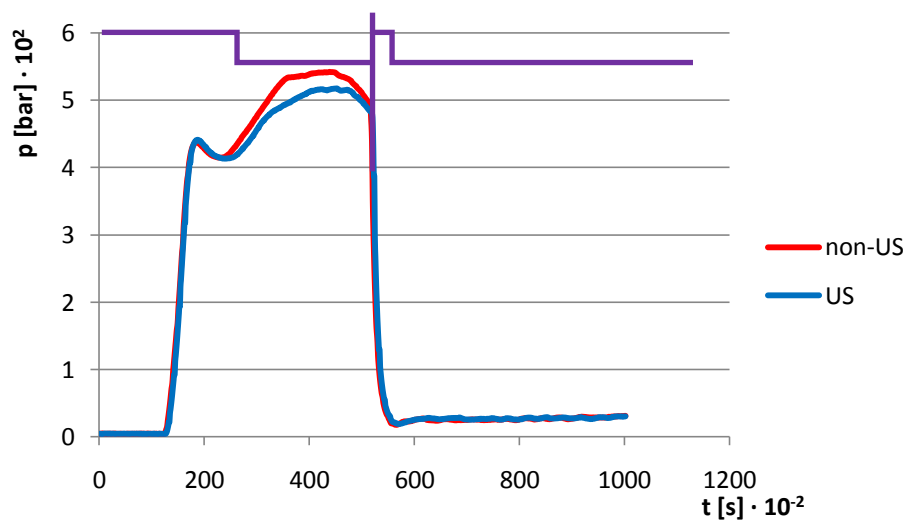
Pentru vitezele de 2 mm/s (figura 4.29) și 4 mm/s (figura 4.30), activarea ultrasonică nu a adus nicio modificare semnificativă a valorilor presiunii înregistrate în timpul injectării, toate încercările având profile de variație ale presiunii din interiorul duzei reometrice similare.

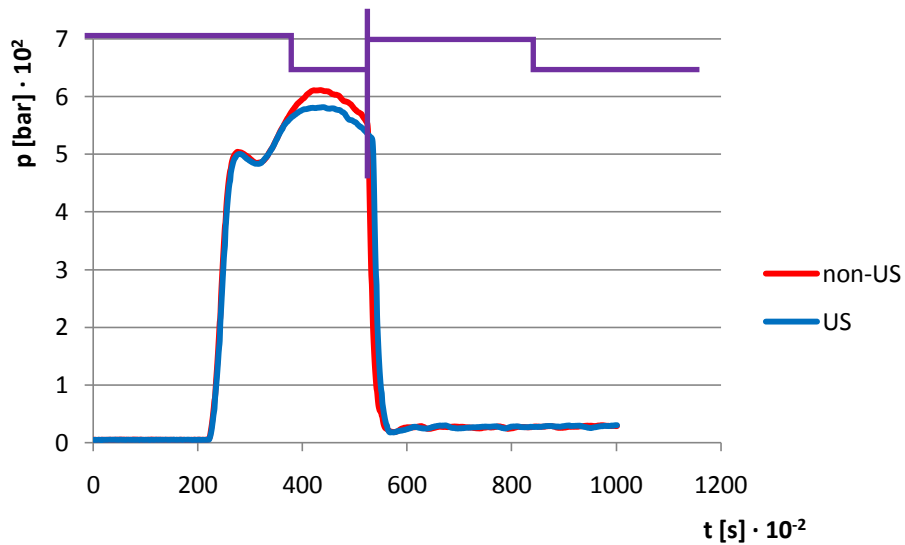
Viteză de injectare $v=4$ mm/sFig. 4.30. $\phi=1$ mm, $L=30$ mm, $v=4$ mm/s**Viteză de injectare $v=5$ mm/s**Fig. 4.31. $\phi=1$ mm, $L=30$ mm, $v=5$ mm/s

Pentru viteza de 5 mm/s, activarea ultrasonică a procedurii de injectare a adus o descreștere a presiunii egală cu 30 de bari echivalentă cu o diminuare de 6% din valoarea inițială (figura 4.31).

Viteză de injectare $v=7$ mm/sFig. 4.32. $\phi=1$ mm, $L=30$ mm, $v=7$ mm/s

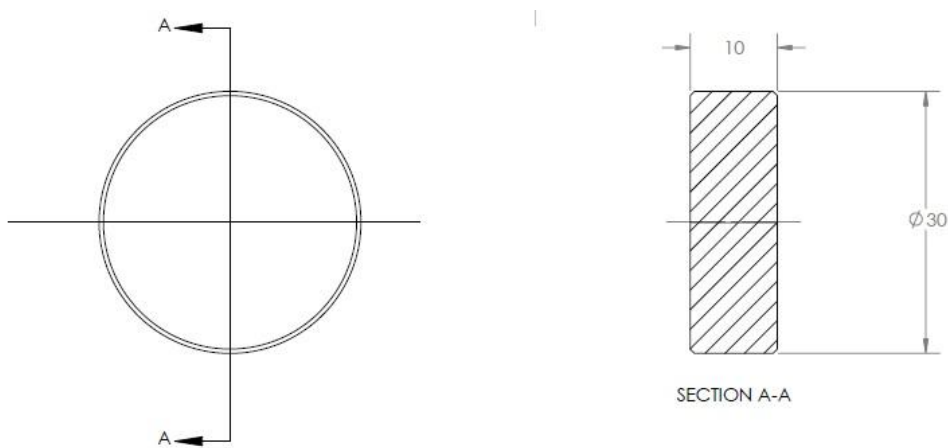
În cazul unei viteze de injectare egală cu 7 mm/s, activarea ultrasonică a generat o diminuare a presiunii egală cu 50 de bari, corespunzătoare unui procent de 10% din valoarea inițială (figura 4.32). Pentru viteza de 8 mm/s, diferența consemnată pe parcursul activării ultrasonice a fost de doar 40 de bari, echivalentă unei descreșteri de 7,5% (figura 4.33).

Viteză de injectare $v=8$ mm/sFig. 4.33. $\phi=1$ mm, $L=30$ mm, $v=8$ mm/s

Viteză de injectare $v=10$ mm/sFig. 4.34. $\phi=1$ mm, $L=30$ mm, $v=10$ mm/s

Pentru ultima viteză de injectare (10 mm/s), presiunea din interiorul duzei a înregistrat o scădere de 30 de bari în timpul activării ultrasonice. Această valoare reprezintă 5% din presiunea medie consemnată în absența activării procesului.

4.4.5. Injectări cu filiera de $\phi 0,3$ mm de grosime 10 mm (raport $L/\phi = 33,33$)

Fig. 4.35. Filieră de $\phi=0.3$ mm și $L=10$ mm

La fel ca și în cazul utilizării celor trei filiere având un diametru interior egal cu 1 mm, au avut loc încercări experimentale pentru două filiere de 0,3 mm, utilizând aceleași viteze de injectare. Rezultatele consemnate sunt prezentate în graficele de variație ale presiunii din figurile 4.36 – 4.44.

Viteză de injectare $v=2$ mm/s

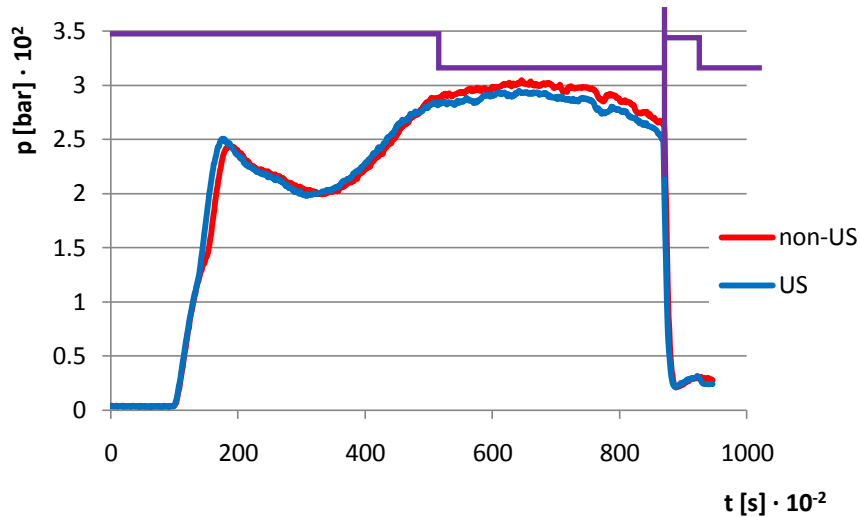


Fig. 4.36. $\phi=0.3$ mm, $L=10$ mm, $v=2$ mm/s

Reducerea de presiune înregistrată pentru o viteză de 2 mm/s a fost egală cu 15 bari reprezentând 5% din valoarea obținută în absența activării ultrasonice (figura 4.36).

Viteză de injectare $v=4$ mm/s

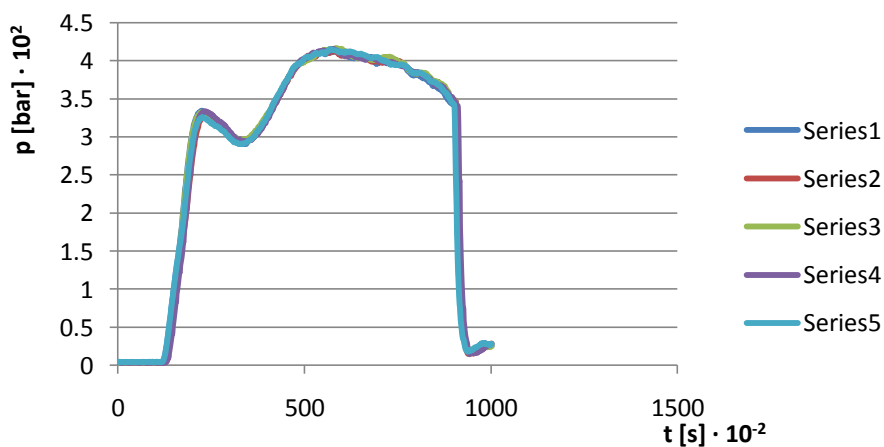
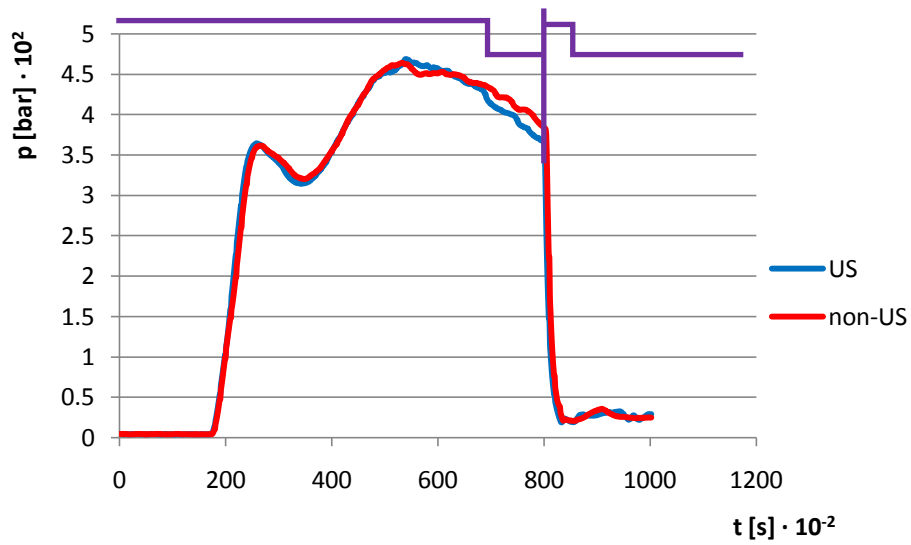
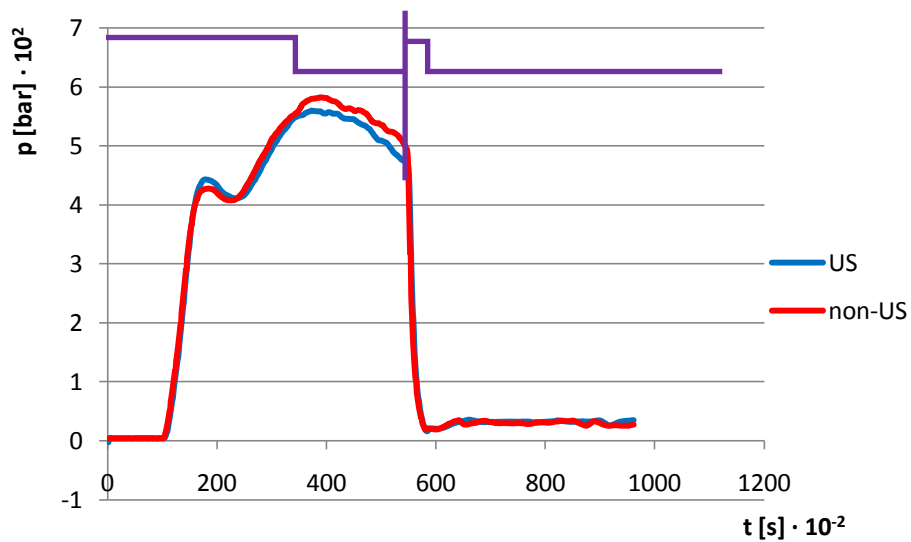


Fig. 4.37. $\phi=0.3$ mm, $L=10$ mm, $v=4$ mm/s

Viteză de injectare $v=5$ mm/sFig. 4.38. $\phi=0.3\text{mm}$, $L=10\text{mm}$, $v=5\text{mm/s}$

Pentru o vitezele de injectare de 5 mm/s și 7 mm/s s-au înregistrat reduceri ale presiunii egale cu 25 de bari (figura 4.38), respectiv 35 de bari (figura 4.39), echivalente unei diminuări de 6% în ambele cazuri.

Viteză de injectare $v=7$ mm/sFig. 4.39. $\phi=0.3\text{mm}$, $L=10\text{mm}$, $v=7\text{mm/s}$

Viteză de injectare $v=8$ mm/s

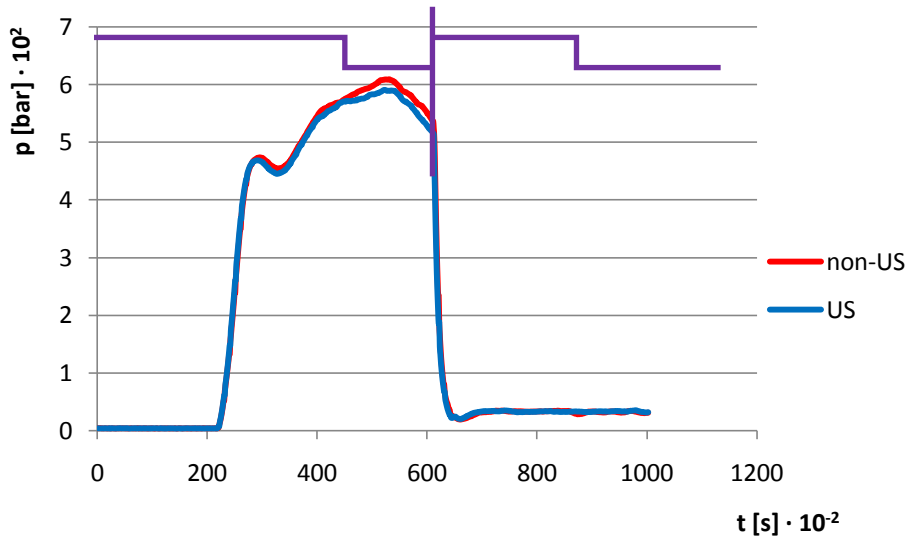


Fig. 4.40. $\phi=0.3$ mm, $L=10$ mm, $v=8$ mm/s

La vitezele cele mai mari de injectare (8 mm/s și 10 mm/s), s-au consemnat scăderi ale presiunii din interiorul duzei reologice în valoare de 25, respectiv 45 de bari, însemnând 4% și 6% din valorile inițiale.

Viteză de injectare $v=10$ mm/s

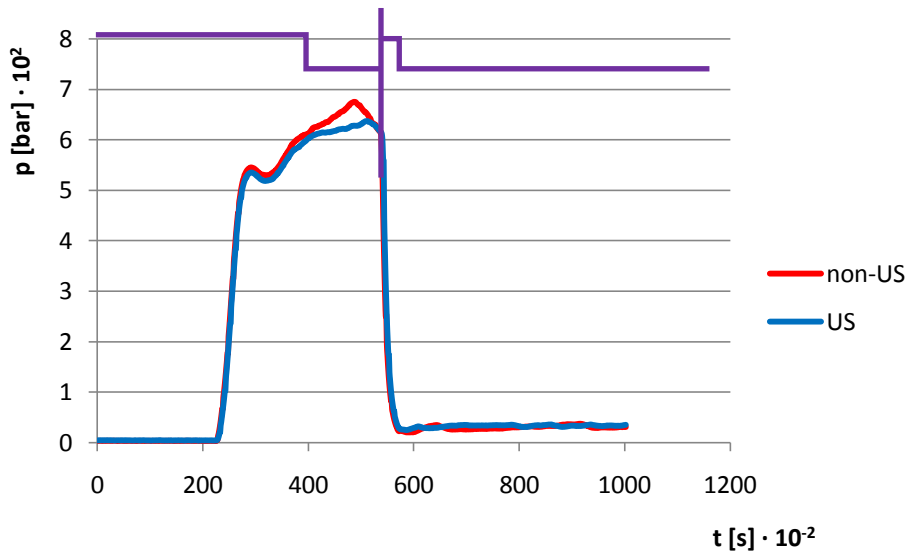
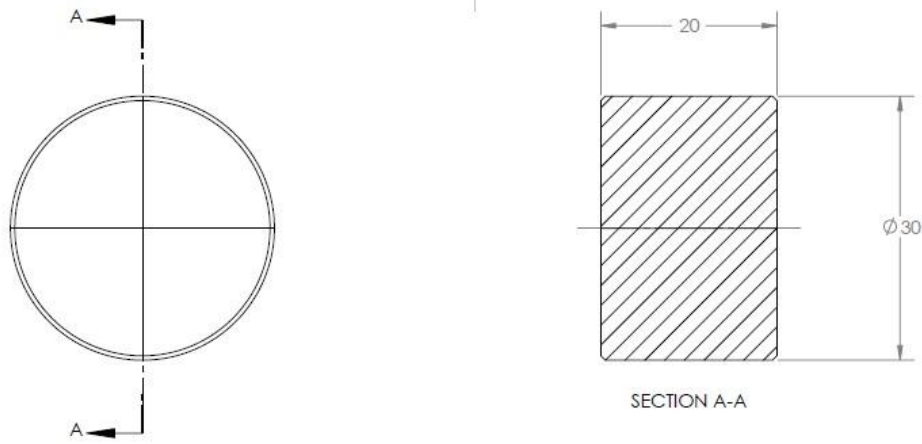
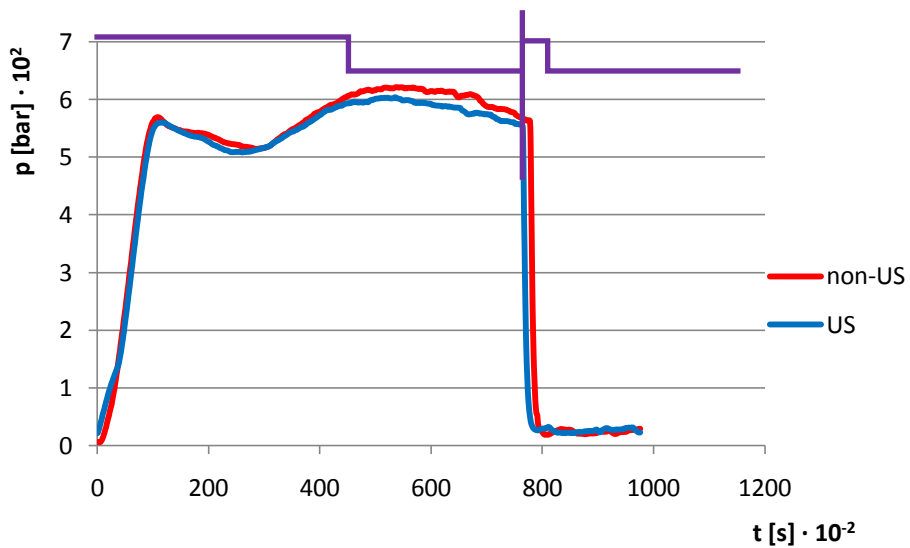


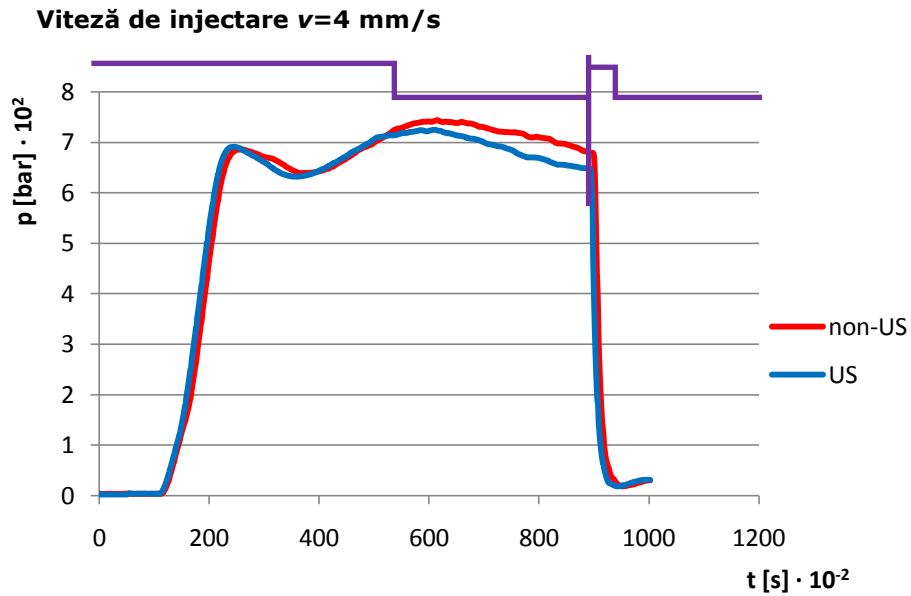
Fig. 4.41. $\phi=0.3$ mm, $L=10$ mm, $v=10$ mm/s

4.4.6. Injectări cu filiera de $\phi 0,3$ mm de lungime 20 mm (raport $L/\phi = 66,66$)

Fig. 4.42. Filieră de $\phi=0.3\text{mm}$ și $L=20\text{mm}$

Viteză de injectare $v=2$ mm/s

Fig. 4.43. $\phi=0.3\text{mm}$, $L=20\text{mm}$, $v=2\text{mm/s}$

Fig. 4.44. $\phi=0.3$ mm, $L=20$ mm, $v=4$ mm/s

Pentru această ultimă configurație ($\phi=0.3$ mm și $L=20$ mm), de la viteze superioare valorii de 4 mm/s, în interiorul duzei se înregistrează presiuni de injectare foarte mari care determină scurgeri de material la interfața concentrator-duză, rezultatele obținute devenind neconcludente. Același lucru este valabil și pentru o ultimă filieră capilară disponibilă de diametru $\phi=0.3$ mm și lungime $L=30$ mm.

4.5. Rezultate experimentale obținute, interpretări și concluzii

Rezultatele experimentale consemnate au făcut obiectul programului de analiză statistică a parametrilor de proces Minitab. Pe baza interpretărilor făcute de acest program s-au putut desprinde următoarele concluzii:

- Parametrii de proces care au un efect semnificativ asupra parametrului de ieșire analizat (presiunea din interiorul duzei reologice) au fost: viteza de injectare, diametrul interior și lungimea filierelor capilare (figura 4.45);

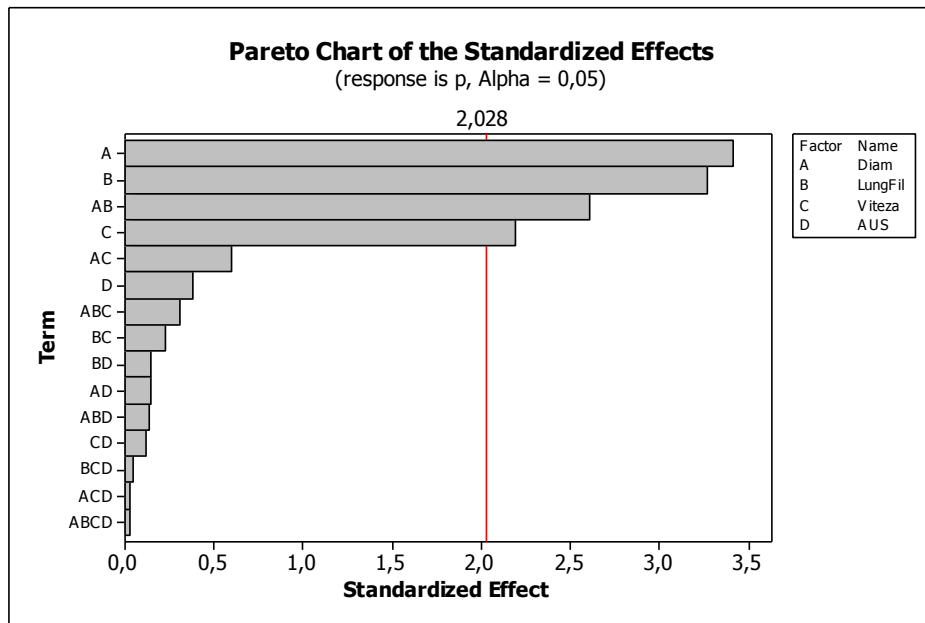


Fig.4.45. Influența parametrilor de proces

- Scăderea diametrului filierei, și acțiunea activării ultrasonice determină creșterea presiunii, același efect avându-l și majorarea vitezei de injectare și a lungimii filierei. Legea de variație a presiunii în funcție de acești parametri este ilustrată în figura 4.46;

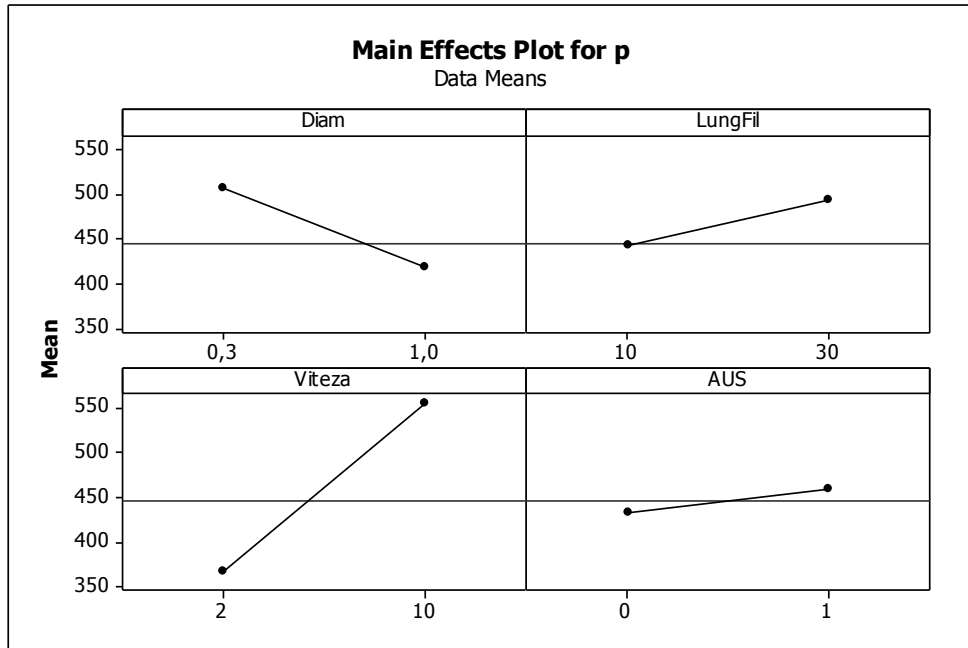


Fig. 4.46. Legile de variație ale presiunii

- Au loc interacțiuni de ordinul doi între diametrul și lungimea filierei, respectiv între lungime și viteza de injectare, între restul parametrilor neexistând interacțiuni în intervalul lor de variație (figura 4.47);

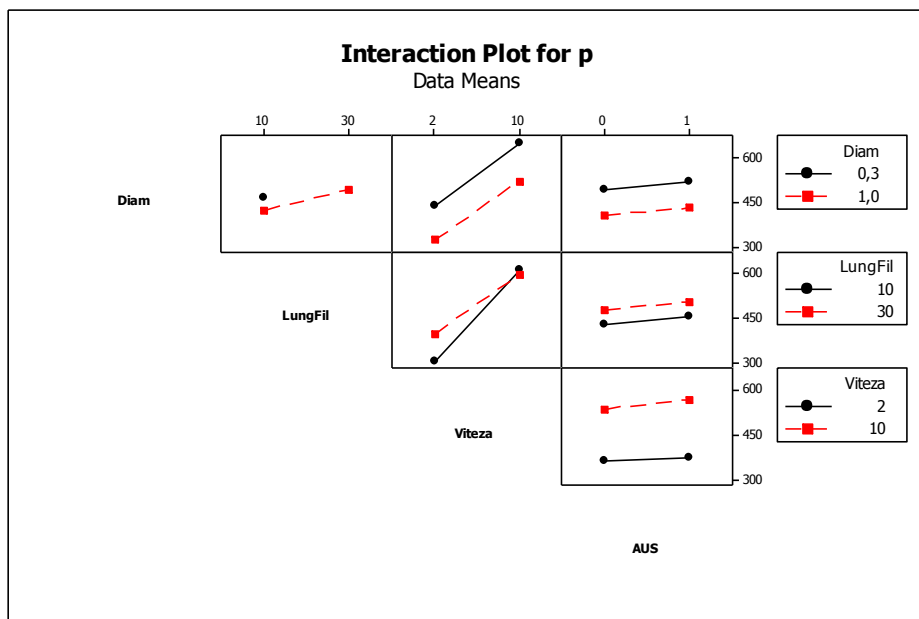


Fig. 4.47. Interacțiunile existente între parametrii procesului

- Valorile combinațiilor de câte doi parametri pentru care se obțin diferite valori ale presiunii din interiorul duzei reologice ne-au fost furnizate de către program și sunt prezentate în figurile 4.48 (variantea bidimensională) respectiv 4.49 (versiunea tridimensională);

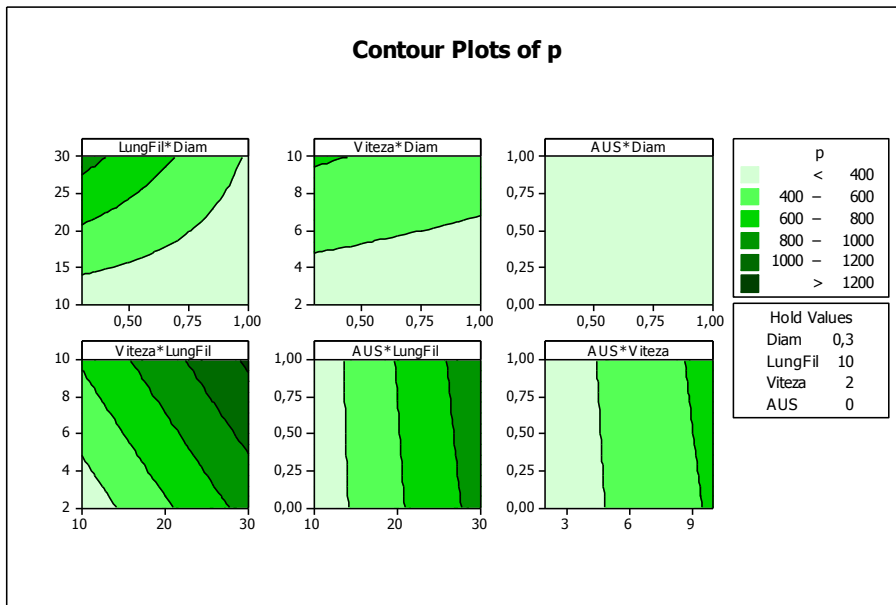


Fig. 4.48. Valorile parametrilor de proces pentru diferite valori ale presiunii (2D)

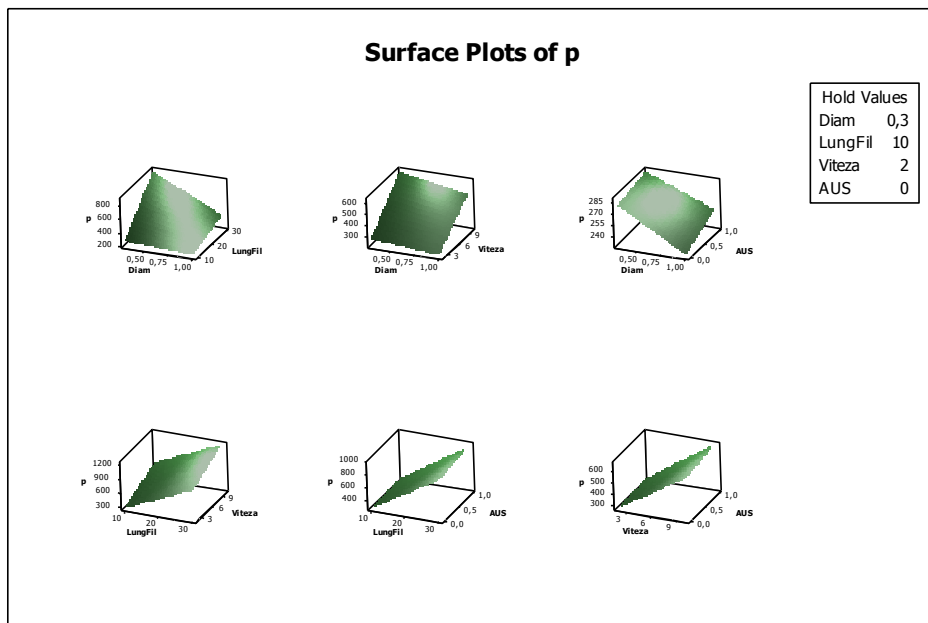


Fig. 4.49. Valorile parametrilor de proces pentru diferite valori ale presiunii (3D)

- În final, programul ne oferă combinația optimă de valori ale parametrilor pentru obținerea unei presiuni în interiorul duzei cât mai mici (figura 4.50).

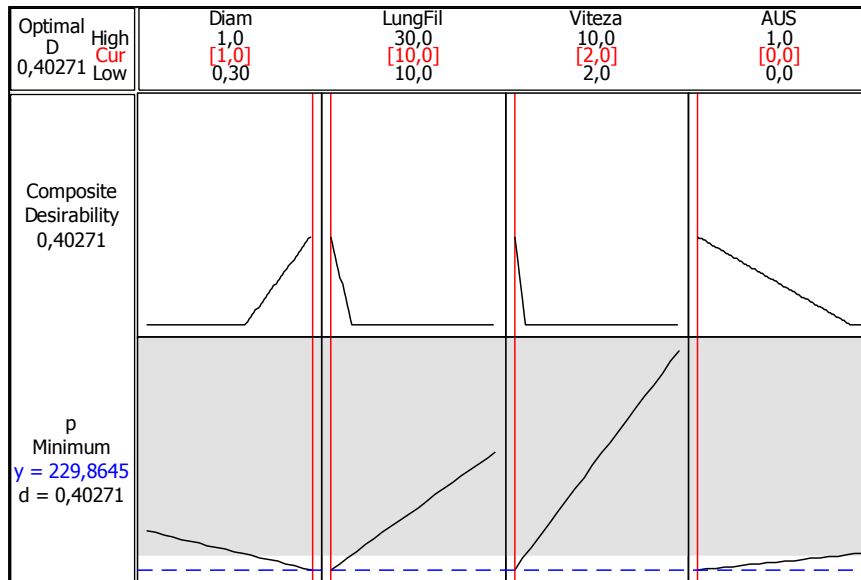


Fig. 4.50. Valorile optime pentru parametrii de proces

Așa cum era de așteptat, influența cea mai mare asupra presiunii de injectare din interiorul duzei o au dimensiunile filierei capilare (diametrul interior și lungimea). Activarea ultrasonică joacă un rol secundar, ameliorând într-o mai mică măsură valorile parametrului de ieșire. Totuși, utilizarea ei se justifică prin configurația soluției optime (figura 4.50), valoarea cea mai mică a presiunii obținându-se în prezența activării ultrasonice.

Activarea ultrasonică a curgerii materialelor polimerice nu a adus nicio ameliorare semnificativă în ceea ce privește temperatura topiturii. O cauză posibilă ar putea reprezenta-o suprafața activă a concentratorului, prea mică în raport cu suprafața interioară totală a duzei reologice pentru a provoca efecte termice măsurabile cu termocupla avută la dispoziție. Efectele vizibile ale activării ultrasonice sunt evidențiabile numai atunci când densitățile de energie ultrasonică sunt apropiate de un prag critic în tot spațiul tehnologic de curgere, ceea ce nu s-a obținut prin montajul realizat. În felul acesta, nu se confirmă modurile de activare locală pe traseul de curgere sugerat și de alte experimete, în special cele realizate în cadrul programului Ultra-melt [www.ultramelt.org]. Un alt motiv pentru care nu am înregistrat variații de temperatură în timpul activării ultrasonice îl reprezintă absența unui dispozitiv de măsură a încălzirii locale produse de propagarea undelor ultrasonice în volumul de material polimeric topit aflat în curgere.

În al doilea rând, raportul volum activat/volum total în spațiul tehnologic de curgere trebuie să depășească valoarea de 0,75 pentru a putea înregistra efecte ale activării ultrasonice traductibile în modificări semnificative ale parametrilor de proces.

Pe de altă parte, la temperaturi ridicate ale topiturii, componenta termică a efectului ultrasonic termopelicular este nesemnificativă.

Presiunile înregistrate de primul captor, situat înaintea concentratorului (dacă avem în considerare sensul de curgere al topiturii polimerice), nu au suferit modificări, nefiind influențate în nici un fel de activarea ultrasonică produsă. Din acest motiv ne-am concentrat exclusiv pe parametrii înregistrați de cel de-al doilea captor, situat în imediata vecinătate a concentratorului. În intervalele de timp în care s-a produs activarea ultrasonică au fost identificate sensibile diminuări ale valorilor presiunii de injectare. Aceste diminuări reprezintă rezultatul celei de-a doua componente a efectului ultrasonic termopelicular, și anume diminuarea frecărilor la interfața material polimeric - concentrator adaptor de undă și de curgere mult mai favorabilă a straturilor de material pe direcția de deplasare. Din păcate, limitările tehnice ale generatorului ultrasonic (destinat în principal operațiilor de sudare) nu au permis efectuarea de activări ultrasonice pe o durată de timp mai mare de 10 secunde.

Pentru a obține rezultate mai bune ar trebui să realizăm o soluție constructivă în care suprafața vibrantă a concentratorului să fie mărită sau să utilizăm mai multe convertoare ultrasonice care să lucreze în paralel. Scopul acestor experimente a fost doar de a evidenția prezența acestui fenomen cu mijloacele tehnologice avute la dispoziție.

Soluția activării ultrasonice pe o direcție transversală direcției curgerii, impusă de constrângerile constructive ale echipamentelor, prezintă interes în cazul în care se introduc în duză două, trei sau patru convertoare ultrasonice dispuse radial și alimentate de la același generator. În cazul acesta este de așteptat ca eficiența curgerii materialului polimeric să crească substanțial cu efecte favorabile și asupra formării piesei.

5. ACTIVAREA ULTRASONICĂ A PROCESULUI DE MICROINJECTARE A MATERIALELOR POLIMERICE

5.1. Analiza soluției tehnice privind matrița de microinjectat activată cu ultrasunete

Platforma experimentală pentru microinjectarea materialelor polimerice activată ultrasonic s-a construit pe baza brevetului BV România 00838/2007, autori Iclănzan Tudor Alexandru, Stan Daniel Voicu, Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel și Cosma Cristian.

Procesul clasic de microinjectare în matrițe prezintă o serie de dificultăți tehnologice, limitându-l și determinând adoptarea unor soluții constructive și funcționale personalizate, dar și foarte costisitoare. Principalul inconvenient al microinjectării îl constituie condițiile dificile de curgere și umplere adecvată a cavităților unei matrițe cu materialul polimeric aflat în stare topită. Astfel, precizia dimensională și de formă a piesei prevăzute în desenul de execuție devine greu de respectat. Un alt neajuns al acestui procedeu îl reprezintă dificultatea cu care se expulzează piesele de dimensiuni foarte mici din cavitățile de formare, dispozitivele valabile în cazul injectării pieselor de dimensiuni normale nemaiputând fi aplicate.

Deficiențele menționate anterior se vor a fi înlăturate prin diferite soluții tehnice care presupun activarea cu ultrasunete a matrițelor de injectare a pieselor din materiale plastice. Activarea acestor matrițe facilitează procesul de curgere al topiturii polimerice și umplerea cavităților de formare ca rezultat al acțiunii efectului ultrasonic termopelicular produs de undele ultrasonice de joasă frecvență (20 - 100 kHz) și de puteri mari (100 - 3000 W), efect descris în detaliu în **subcapitolul 1.6.4**. Acest efect se manifestă pe de o parte prin încălzirea locală suplimentară a materialului polimeric având ca efect creșterea fluidității și a vitezei de curgere, iar pe de altă parte prin diminuarea frecării dintre materialului polimeric topit aflat în curgere și suprafața metalică a concentratorului ultrasonic imersat în volumul topiturii.

Activarea eficientă cu ultrasunete a matrițelor de injectare este posibilă numai dacă elementele active ale ansamblului ultrasonic (concentratoarele adaptoare de undă) funcționează în regim de rezonanță cu restul sistemului. Acest deziderat se realizează prin dimensionarea lor la lungimi egale cu jumătatea lungimii de undă ($\lambda/2$) și la diametre inferioare lui $\lambda/4$. În cazul fabricării acestor elemente din oțel, aluminiu sau aliaje ale lor și a stabilirii frecvenței de lucru la 20 kHz, lungimea lor ajunge de aproximativ 130 mm. Forma lor este în general cilindrică, cilindrică în trepte, conică sau exponențială, prinderea și fixarea lor de structura mașinii de injectat putând fi făcută doar în zona lor nodală pentru a nu se disipa energia ultrasonică pe care o transmit și pentru a nu împiedica funcționarea în regim de rezonanță a sistemului ultrasonic. Datorită acestor condiții pe care trebuie să le îndeplinească, concentratoarele adaptoare de undă se proiectează individual pentru fiecare aplicație în parte, ținându-se cont de forma și dimensiunile matrițelor, natura aplicației și performanțele dorite.

În literatura internațională de specialitate sunt cunoscute diferite soluții tehnice de activare a curgerii polimerilor prin canale de dimensiuni reduse prin încălzirea cu curenți de înaltă frecvență a plăcilor din zonele active (Brevet US

Un transductor ultrasonic piezoelectric sau magnetostrictiv (1), alimentat cu curent electric de un generator de ultrasunete, este solidar cu concentratorul adaptor de undă de formă cilindrică în trepte (2). Concentratorul este fixat în structura pachet a platoului mobil al unei matrițe printr-o flanșă prevăzută în zona sa nodală. Structura pachet a părții mobile a matriței este formată din carcasa (11), plăcile intermediare mobile (12) și (13) și placa de fixare (14). Ansamblul ultrasonic generează unde elastice care se propagă în concentrator, valoarea maximă a amplitudinii lor înregistrându-se la capătul unde este montată prin înșurubare pastila (3), care are gravate cavitatarea sau cavitățile de formare. În timpul procesului de injectare, pastila (3) se găsește în contact la nivelul planului de separație cu pastila (4) purtătoare a orificiului/orificiilor de injectare și a canalului/canalelor de distribuție a materialului polimeric. Pastila (4) este la rândul ei montată prin înșurubare pe un concentrator adaptor de undă cu rol reflector (5), de formă cilindrică în trepte, proiectat în semilungime de undă și fixat în zona lui de flanșă de structura pachet a platoului fix al matriței (7). Structura pachet a platoului fix este compusă din plăcile intermediare fixe (8) și (9) și placa de fixare (10). În interiorul corpului adaptor de undă se găsește înșurubat în zona sa nodală o tijă ascuțită (6) încălzită prin intermediul unei rezistențe electrice montate la capătul ei superior. Rolul acestei tije este de a încălzi suplimentar și controlat materialul polimeric aflat în vecinătatea orificiului/orificiilor de injectare prevăzute în pastila (4), compensând eventualele pierderi termice din interiorul corpului reflector. Corpul adaptor de undă (2) are prevăzute în zona sa de flanșă orificii destinate răcirii pastilei (3) pentru a facilita și grăbi solidificarea pieselor injectate, contribuind astfel la scurtarea unui ciclu de injectare. După încheierea fazelor de injectare și menținere are loc deschiderea matriței la nivelul planului ei de separație. Evacuarea pieselor solidificate din cavitățile de formare se realizează printr-o emisie controlată de energie ultrasonică sau prin generarea de impulsuri ultrasonice în corpul adaptor de undă. Deplasarea plăcilor (11), (12), (13) și (14) este asigurată de coloanele și bușele de ghidare (15) și (16) cu care este prevăzută mașina de injectat. Această soluție constructivă asigură prin forma și dimensiunile ei funcționarea optimă în regim de rezonanță a ansamblului ultrasonic.

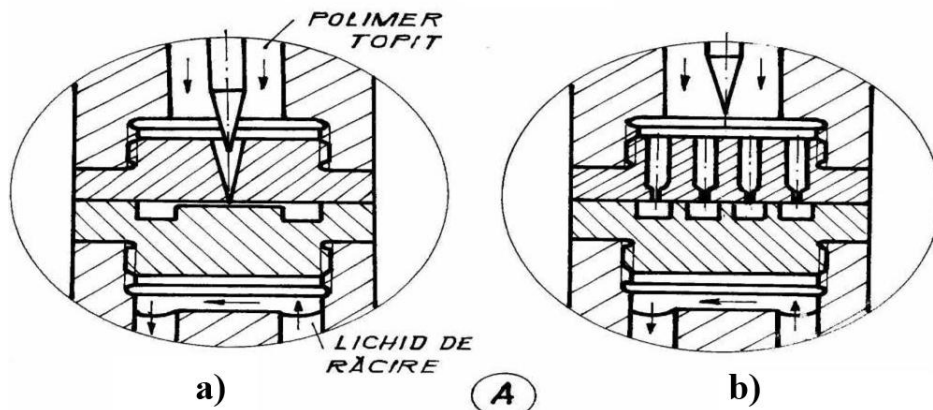


Fig. 5.2. Detalii pentru vederea în secțiune a matriței pentru microinjectare [BV România 00838/2007]

În figura 5.2 sunt prezentate detaliile pentru vederea în secțiune la nivelul pastilelor atașate în concentratorul adaptor de undă, respectiv corpului reflector. În figura 5.2 a) pastila atașată corpului reflector este prevăzută cu un orificiu central de injectare, în timp ce pastila concentratorului are o singură cavitate de formare. În detaliul din figura 5.2 b) pastila corespunzătoare corpului reflector are patru orificii de injectare distribuite simetric, iar în pastila montată în concentratorul adaptor de undă sunt gravate patru cavități de formare.

Asigurarea fluidității materialului polimeric și a umplerii corespunzătoare a cavităților de dimensiuni reduse se face prin utilizarea unor pastile atașabile prin înșurubare la concentratoarele adaptoare de undă dispuse axial. Condițiile optime de desfășurare a procesului de microinjectare sunt asigurate de construcția corectă a concentratoarelor adaptoare de undă, de fixarea lor corespunzătoare în pachetul plăcilor suport, de controlul încălzirii materialului polimeric și a răcirii pastilelor de formare.

Avantajele aduse de această invenție sunt:

- Prin construcția, forma și dimensiunile componentelor sale asigură funcționarea în regim de rezonanță a unui sistem ultrasonic prin materializarea de ventre în zonele active și de noduri în zonele de fixare, determinând un randament maxim de transfer al energiei ultrasonice;
- Asigură, cu consum minim de energie, producerea efectului ultrasonic termopelicular în interstițiile de curgere și în cavitățile de formare ale matrițelor;
- Realizează injectarea materialului polimeric în planul nodal al concentratorului adaptor de undă;
- Permite injectarea unor piese de diverse forme și dimensiuni datorită folosirii unor pastile purtătoare de cavități interschimbabile;
- Posibilitatea răcirii pastilei care are gravată cavitatea de injectare;
- Evacuarea piesei injectate la sfârșitul ciclului de injectare prin activare continuă sau prin impulsuri de energie de scurtă durată.

5.2. Descrierea platformei experimentale

În acest subcapitol este prezentată maniera în care s-a făcut adaptarea soluției tehnice propusă de brevetul BV România 00838/2007, astfel încât să facă posibilă activarea ultrasonică a unei matrițe pentru microinjectare ce poate fi montată pe o mașină multifuncțională de injectare/extrudare, construcție Univeristatea "Politehnica" din Timișoara, prezentată în figura 5.3.



Fig. 5.3. Mașina de injectat și extrudat material polimeric

Pentru îndeplinirea acestui deziderat s-a ținut cont de particularitățile constructive și dimensionale care le prezintă această mașină. Datorită faptului că soluția propusă brevet este destinată unei mașini de injectat prevăzută cu plan de separație orizontal (deschiderea matriței făcându-se pe o direcție verticală), vor trebui operate o serie de modificări pentru a o face aplicabilă pentru proiectarea unei matrițe compatibile cu mașina de injectat polimeric avută la dispoziție.

Mașina de injectat și extrudat material polimeric reprezintă un prototip de mici dimensiuni de construcție Univeristatea "Politehnica" din Timișoara și prezintă următoarele particularități constructive:

- Dispune de un cilindru de injectare de dimensiuni reduse, încălzit prin intermediul unor rezistențe electrice externe dispuse de jur împrejurul lui;
- Controlul temperaturii materialului polimeric topit se face cu ajutorul unei termocuple introduse într-un locaș special conceput în interiorul cilindrului de injectare;
- Termocupla este cuplată la un termometru cu termoregulator astfel încât să facă posibilă menținerea constantă a temperaturii cilindrului de injectare între anumite limite specificate de utilizator;
- Melcul de injectare este înlocuit cu un piston; În mod normal absența melcului ar trebui să constituie un mare dezavantaj deoarece, pe lângă rolul de a împinge materialul în matrită contribuie și la dozarea și omogenizarea lui în interiorul cilindrului de injectare. Dar, date fiind dimensiunile reduse ale cilindrului de injectare, menținerea unei temperaturi constante în tot volumul de material din interiorul lui se realizează mai ușor decât în mod normal;
- Pistonul de injectare este acționat pneumatic de un compresor de aer care poate să furnizeze presiuni de până la 10 bari;
- Sistemul de închidere și menținere al matriței este hidraulic, permițând regularizarea forțelor de închidere și menținere;
- Timpul de menținere este controlat prin intermediul unui temporizator;
- Mașina de injectat este orizontală, deci planul ei de separație este vertical;
- Comenzile și acționările sunt electrice.
- Închiderea și deschiderea matriței se realizează prin deplasarea platoului mobil pe coloanele de ghidare.

Pentru o mai ușoară înțelegere a felului în care funcționează mașina de injectat, sunt prezentate schematizat în figura 5.4 elementele sale componente într-o vedere de sus.

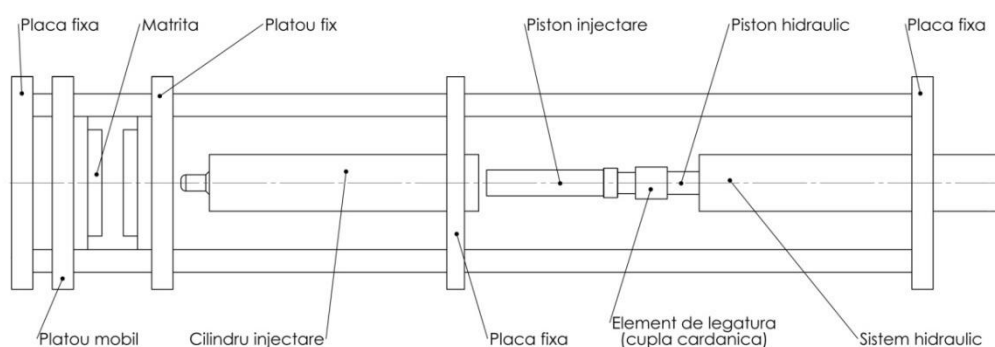


Fig.5.4. Vedere de sus schematizată a mașinii de injectat

Datorită particularităților mai sus menționate și a formei constructive a mașinii de injectat, brevetul a suferit următoarele modificări:

- În brevet injectarea se făcea prin flanșa corpului reflector, la mașină ea se face cu duza pătrunzând axial în interiorul corpului reflector atingându-l în interior în zona de flanșă. Între diametrul exterior al

duzei și diametrul interior al corpului reflector trebuie să existe o diferență de câțiva milimetri pentru a nu exista contact între cele două elemente decât în zona de flanșă a reflectorului, după cum se poate observa în figura 5.5;

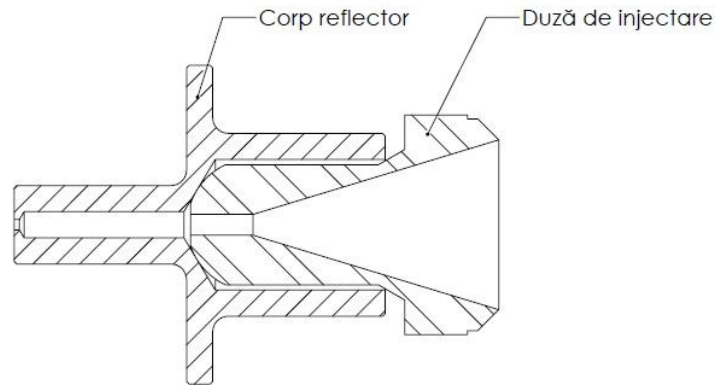


Fig. 5.5. Vedere în secțiune a duzei de injectare și a corpului reflector

- Duza apasă cu presiune pe corpul reflector direcționând materialul polimeric spre cavitățile de injectare;
- Spre deosebire de soluția propusă de brevet au fost eliminate cele două pastile înșurubabile, corpul reflector fiind prevăzut cu orificiu de injectare, iar pe suprafața frontală a concentratorului fiind frezată cavitatea de injectare;
- Răcirea concentratorului nu s-a mai considerat a fi necesară datorită duratelor foarte scurte de timp în care componentele încălzite ale matriței sunt în contact direct cu concentratorul purtător al cavităților de formare (un ciclu de injectare este de ordinul a câteva secunde), iar suprafața de contact dintre corpul reflector și concentrator este la randul ei foarte redusă;
- Datorită faptului că injectarea nu se mai face din lateral, ci axial și a absenței circuitelor de răcire din structura concentratorului, au fost suprimate din structurile pachet ale celor două platouri (cel fix, respectiv cel mobil) câte o placă intermediară fixă.

Odată operate aceste modificări, matrița pentru microinjectare activată ultrasonic se prezintă conform desenului din figura 5.6:

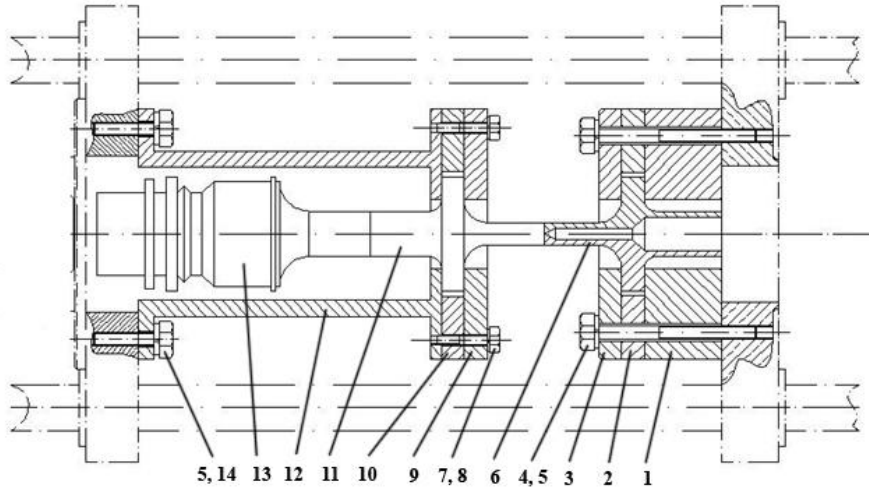


Fig. 5.6. Vedere în secțiune a matriței de injectare activată ultrasonic

Corpul reflector (6) este solidarizat cu platoul fix prin intermediul unui pachet format din placa suport fixă (1), placa intermediară fixă (2) și placa de fixare (3) și a șuruburilor M10 (4) și șaiabelor Grover N10 (5). Convertorul ultrasonic (compus din concentratorul adaptor de undă (11) și transductorul (13)) se prinde de platoul mobil al matriței cu ajutorul pachetului format din placa de fixare (9), placa intermediară mobilă (10), carcasa (12), șuruburile M8 (7) și M10 (14) și șaibele Grover N8 (8) și N10 (5). Planul de separație este la suprafața de contact dintre concentratorul adaptor de undă și corpul reflector. Închiderea, respectiv deschiderea matriței se realizează prin deplasarea platoului mobil cu concentratorul adaptor de undă și transductorul ultrasonic solidare cu el.

Toate componentele matriței pentru microinjectare au fost executate pe mașinile unelte convenționale (strung normal, mașină de frezat și mașină de rectificat) din laboratorul Tehnologia Construcției de Mașini. Asamblarea lor și montarea pe mașina de injectat este prezentată în figura 5.7.



Fig.5.7. Matriță pentru microinjectare activată ultrasonic

Cavitatea de injectare se va executa pe fața activă a concentratorului adaptor de undă, unde amplitudinea de oscilație a vibrațiilor ultrasonice este maximă. Astfel, materialul polimeric injectat în cavitate va fi activat cu cantitate maximă de energie ultrasonică concentrată în acel loc.

5.3. Obținerea cavității de formare

Pentru un control riguros al volumului de material polimeric injectat, am optat pentru realizarea unei cavități de formare care să urmărească traiectoria descrisă de o spirală arhimedică cu un pas de 1,8 mm care efectuează trei rotații. Adâncimea cavității de formare a fost aleasă de 1 mm. Motivația alegerii acestei forme este dată de necesitatea de a avea o cavitate cât mai greu de umplut prin metode clasice de injectare, valorificând în același timp la maxim aria suprafeței frontale a concentratorului.

Prelucrarea cavității de formare s-a realizat pe mașina de frezat cu viteze ridicate cu comandă numerică i-mes Premium 3020 (figura 5.8).



Fig. 5.8. Mașina CNC de frezat cu viteze ridicate i-mes Premium 3020

Această mașină este destinată frezării, gravării sau măsurărilor de precizie ridicată a diferitelor repere și prezintă următoarele caracteristici constructive:

- Gabarit: 1400 x 1700 x 800 mm;
- Masă de lucru: 320 x 250 mm;
- Cursă de lucru: 250 x 190 x 180 mm;
- Turație maximă: 40000 rot/min;
- Repetabilitate: < 0,005 mm;
- Precizie: 0,001 mm;

Materiale ce pot fi prelucrate la viteze ridicate cu ajutorul acestei mașini sunt aluminiul, oțelul, titanul, plasticul, cuprul, aurul sau lemnul.

Programul de comandă numerică a fost generat în soft-ul Pro Engineering, parcurgându-se mai multe etape în vederea execuției cavității de formare.

După introducerea reperului tridimensional proiectat în prealabil (figura 5.9), prima etapă constă în alegerea mașinii de prelucrat, a originii piesei și a planului de retragere a sculei așchietoare.

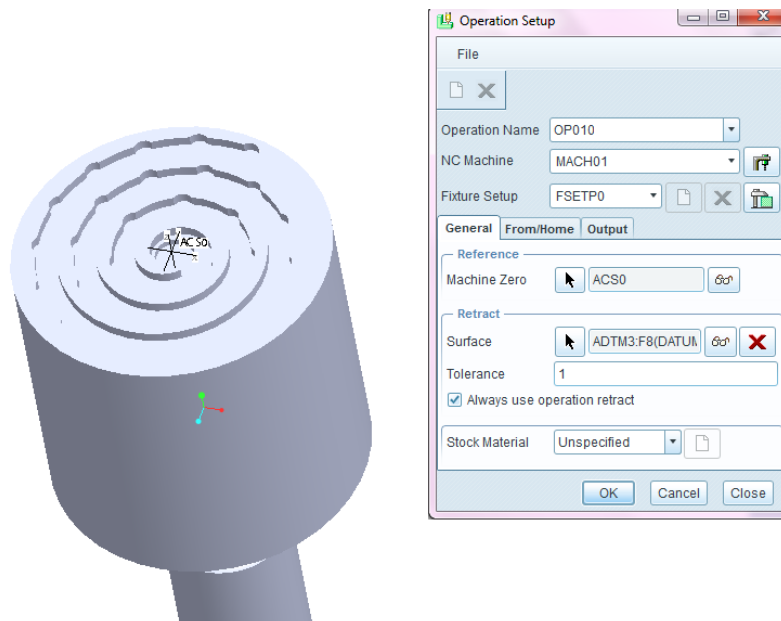


Fig.5.9. Introducerea reperului 3D în softul Pro E

Definirea mașinii de lucru se face prin alegerea tipului mașinii de prelucrat prin așchiere (freză sau strung) pe care urmează să se execute reperul. Urmează precizarea numărului de axe pe care se poate deplasa mașina (3, 5 sau 6) și a sculelor așchietoare ce se vor regăsi în magazia de scule (figura 5.10).

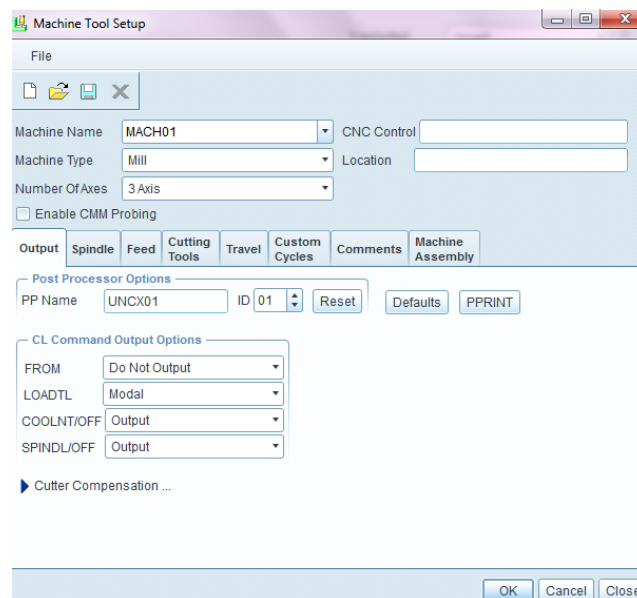


Fig. 5.10. Alegerea tipului mașinii de prelucrat, a numărului de axe și configurarea magaziei de scule

Originea piesei se va alege în centrul suprafeței, iar planul de retragere al sculei se va afla la o înălțime de 5 mm față de suprafața piesei, după cum se observă în figura 5.11.

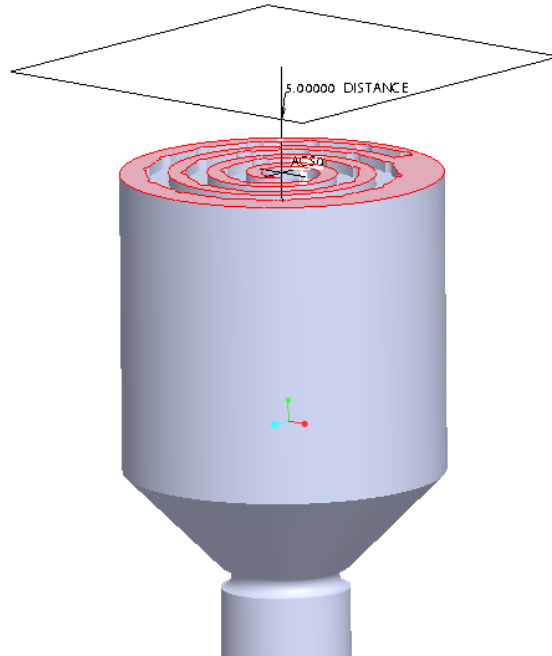


Fig.5.11. Alegerea originii reperului și a planului de retragere al sculei

Scula utilizată pentru această prelucrare este o freză cilindro-frontală cu un diametru de 1 mm, freză cu care se va realiza atât operația de degroșare, cât și finisarea (figura 5.12). Având în vedere că prelucrarea se efectuează pe o mașină care lucrează la turații ridicate, este necesară folosirea unor scule monobloc din carburi cu o configurație specială acestui tip de prelucrări.

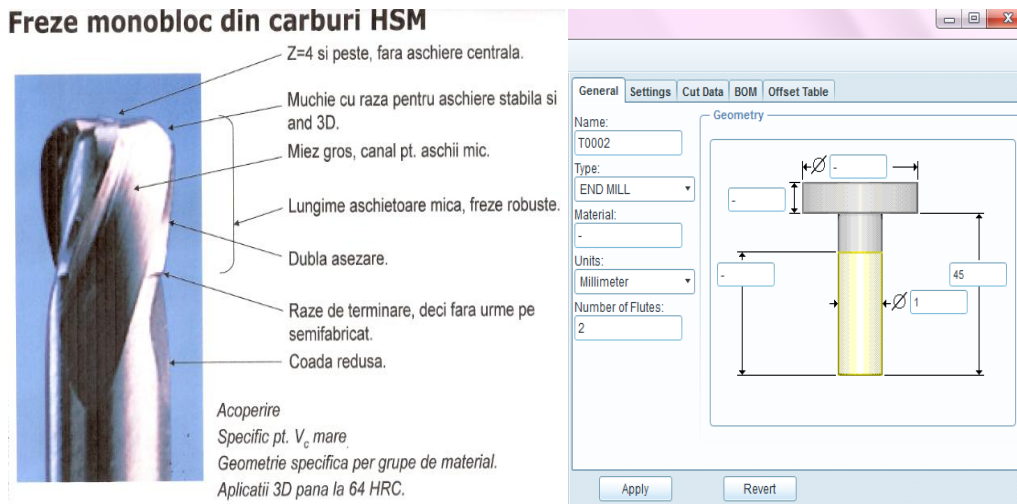


Fig. 5.12. Alegerea sculei aşchietoare

Pentru frezele destinate procesului de frezare la viteze ridicate se folosesc turații și viteze de avans ridicate la adâncimi de achiere mici.

Parametrii de aschiere aleși au fost:

- viteza de avans: 30 mm/min;
- turația: 18000 rot/min;
- adâncimea de aşchiere: 0,05 mm;
- pasul între trecerile frezei: 0,25 mm;
- strategia de aşchiere aleasă: Spiral.

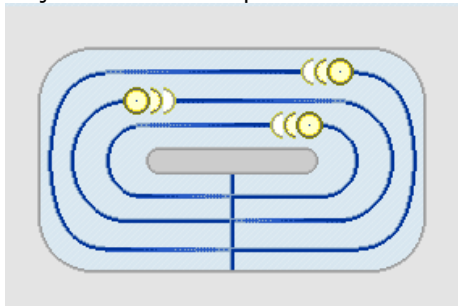


Fig.5.13. Traiectoria descrisă de sculă în cazul strategiei de aşchiere Spiral

Faza de aşchiere este una dublă (Rough & prof) constând în realizarea degroșării (1) cu scopul de a îndepărta cât mai mult material, urmată apoi de finisarea (2) când freza va aşchia doar marginile profilului (figura 5.13).

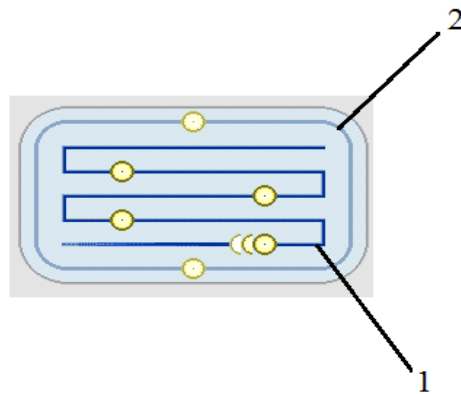


Fig.5.13. Operațiile de degroșare (1) respectiv finisare (2)

Intrarea frezei în material se va face sub un unghi de 1° , așa cum este prezentat în figura 5.14.

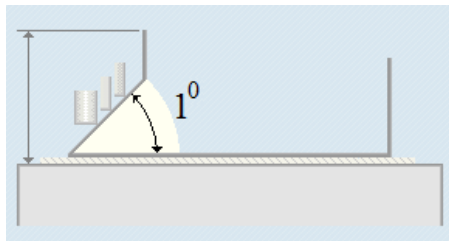


Fig. 5.14. Intrarea frezei în material

În figura 5.15 este prezentată traiectoria sculei așchietoare care va realiza ambele operații (de degroșare și finisare).

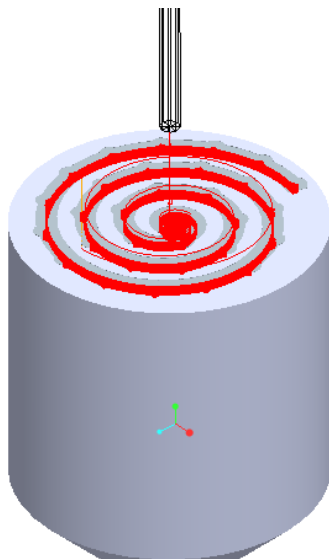


Fig. 5.15. Traiectoria urmărită de scula așchietoare

În urma operațiilor de degroșare și finisare realizate pe mașina de frezat, cavitatea de formare executată pe suprafața frontală a concentratorului adaptor de undă se prezintă ca în figura 5.16.

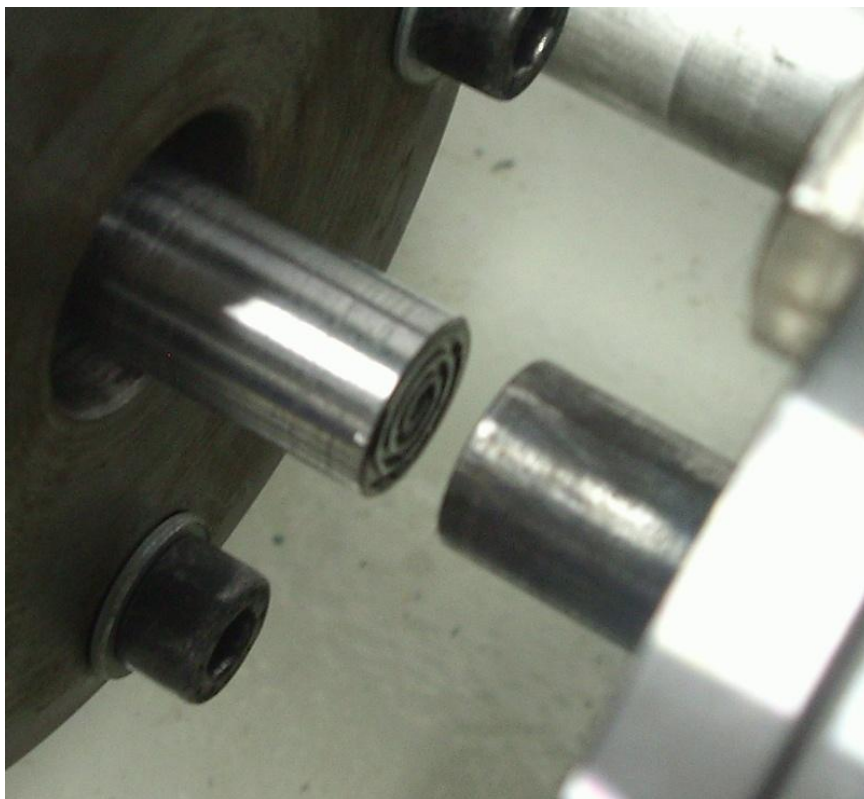


Fig. 5.16. Cavitatea de formare executată în formă de spirală arhimedică

5.4. Realizarea planului de experimente și a încercărilor experimentale

Pentru a pune în evidență influența activării ultrasonice a matriței de microinjectare construite, s-a realizat un plan de experimente care să evalueze factorul de impact al acesteia în raport cu ceilalți parametri de injectare (presiunea de injectare, temperatura de injectare și temperatura matriței). S-a urmărit gradul de umplere al cavității de injectare executată pe suprafața frontală a concentratorului adaptor de undă în cazul varierii parametrilor de injectare între următoarele limite:

- Presiunea de injectare în intervalul 20...60 bari;
- Temperatura de injectare între 210 și 250 °C;
- Temperatura matriței cu valori cuprinse între 35 și 50 °C.

Piesele injectate au fost cântărite, atât integral, cât și fără culee, cu ajutorul unui cântar electronic de mare precizie, după cum se observă în figura 5.17.



Fig.5.17. Cântărirea pieselor injectate

Materialul injectat a fost polietilena de înaltă densitate, cu o valoare a densității calculate egală cu 0,88 g/cm³. Pe baza acestei valori a densității și a maselor de material injectat s-a calculat lungimea spiralei injectate în cazul fiecărei încercări în parte:

$$L = \frac{m_s}{A \cdot \rho} \quad (5.1)$$

unde L este lungimea spiralei, m_s este masa piesei, ρ este densitatea iar A este aria secțiunii canalului de injectare (figura 5.18).

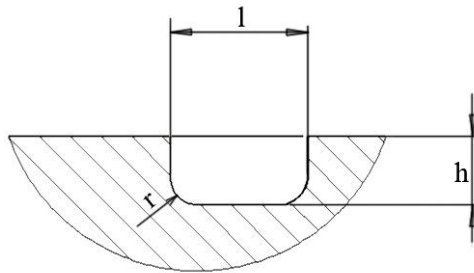


Fig.5.18. Secțiune în canalul de injectare

$$A = [l \cdot (h - r)] + [(l - 2r) \cdot r] + \frac{\pi r^2}{4} \quad (5.2)$$

Pentru valorie $l = 1\text{mm}$, $h = 0,5\text{mm}$, $r = 0,2\text{mm}$ rezultă o arie $A = 0,45\text{mm}^2$. Astfel, pentru polipropilena de înaltă densitate cu $\rho = 0,88\text{g/mm}^3$, lungimea spiralei se va calcula cu relația:

$$L = \frac{m}{0,396} \quad (5.3)$$

Ținând cont de toate aceste aspecte, s-a întocmit planul de experimente prezentat în tabelul 5.1.

Presiune [bar]	Temp. injectare [°C]	Temp. matriță [°C]	Activare US [nu=0, da=1]	Masă cântărită [mg]	Masă culee [mg]	Masă spirală [mg]	Lungime spirală [mm]
40	210	35	0	14,44	11,66	2,78	7,02
20	250	35	0	13,42	10,57	2,85	7,20
20	250	50	0	14,5	11	3,5	8,84
40	210	50	0	15,625	10,25	5,375	13,57
20	210	50	0	13	10,5	2,5	6,31
40	250	35	0	15,71	11,42	4,29	10,83
20	210	35	0	9,2	7,7	1,5	3,79
40	250	50	0	22,6	16,3	6,3	15,91
40	210	40	0	16,6	12	4,6	11,62
20	210	35	1	3,14	1,70	1,44	3,65
40	250	50	1	14,32	6,54	7,78	19,7
20	250	35	1	7,2	3,90	3,30	8,35
40	210	50	1	13,57	6,30	7,27	18,4
40	210	35	1	7,02	3,19	3,83	9,7
40	250	35	1	10,83	4,87	5,96	15,1
20	250	50	1	8,84	4,73	4,11	10,4
20	210	50	1	6,31	3,53	2,78	7,05

Tabelul 5.1. Planul de experimente

5.5. Interpretarea rezultatelor experimentale și concluzii

Încercările experimentale de injectare însoțită de activarea ultrasonică nu au putut fi realizate în configurația stabilită inițial datorită inhibării sistemului ultrasonic. Această inhibare a fost provocată de forța de închidere a matriței care modifică de o manieră drastică frecvența de rezonanță a sistemului ultrasonic. Pentru a analiza acest fenomen, convertorul ultrasonic a fost conectat la un aparat de măsurat frecvența de rezonanță și impedanța acustică a sistemului pentru diferite valori ale presiunii de închidere. Rezultatele au fost consemnate în tabelul 5.2.

Presiunea p [atm]	Impedanța Z [ohm]	Frecvența f [KHz]
10	107	45,351
10	110	45,373
15	106,6	45,566
15	105,2	45,578
20	100,1	45,624
25	109,6	45,751
25	109,3	45,755
30	108,2	45,866
30	109,3	45,882
35	105,2	45,891
40	104,9	45,926
40	105,1	45,931
45	102,2	45,976
45	101,5	45,976
50	101,9	45,991
50	102,1	45,991

Tabelul 5.2. Variația frecvenței de rezonanță și a impedanței acustice în funcție de forța de închidere a matriței

Pe baza acestor măsurători s-a trasat graficul de dependență a frecvenței de rezonanță în funcție de presiunea de închidere a matriței, grafic ilustrat în figura 5.19.

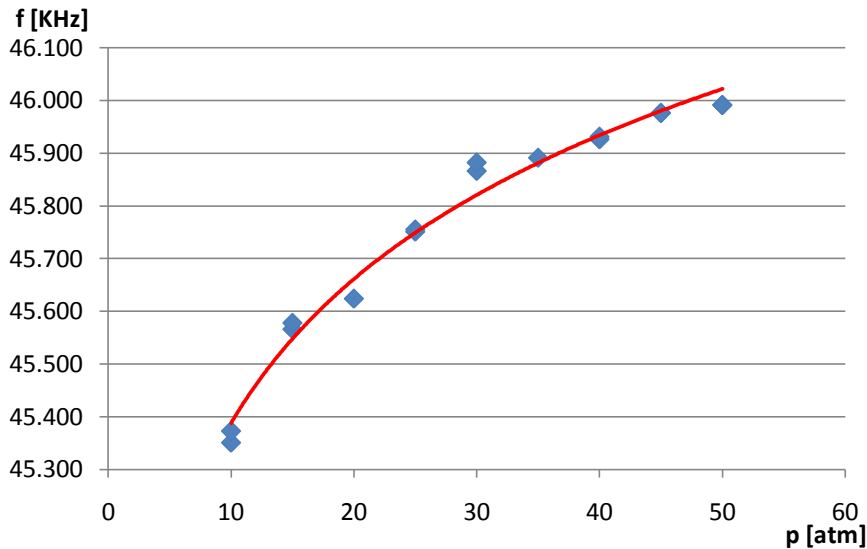


Fig.5.19. Variația frecvenței de rezonanță în funcție de presiunea de închidere a matriței

Creșterea forței de închidere a matriței determină majorări ale frecvenței de rezonanță a sistemului ultrasonic. Valorile între care variază frecvența de rezonanță (45,3...46 kHz) a convertorului ultrasonic (transductor ultrasonic + concentrator adaptor de undă) sunt însă mult prea mari pentru a putea intra în rezonanță cu generatorul ultrasonic de frecvență nominală (40 kHz), motiv pentru care sistemul ultrasonic nu funcționează. S-au efectuat teste și la presiuni inferioare valorii de 10 bari, dar rezultatele înregistrate de aparatul de măsură nu au putut fi concludente. Acest fapt este posibil să se fi datorat propagării haotice a undelor ultrasonice în volumul concentratorului, concentrarea de energie în capătul său activ nemaiputându-se realiza.

Ca posibile soluții constructive pentru a elimina acest inconvenient se menționează:

- Utilizarea unui limitator de cursă a platoului mobil;
- Proiectarea concentratorului adaptor de undă la o frecvență inferioară frecvenței de rezonanță a generatorului ultrasonic și a transductorului;
- Folosirea unui sistem de control automatizat pentru reglarea presiunii.

Limitatorul de cursă a platoului mobil ar avea rolul de a împiedica concentratorul adaptor de undă să mai apese cu presiune pe corpul reflector. În acest fel, cele două elemente ar urma să fie doar în contact mecanic direct, fără ca unul dintre ele să exercite o presiune suplimentară celei de contact asupra celuilalt. Sistemul pneumatic care controlează deplasarea platoului mobil ar urma să aibă rol doar în asigurarea contactului între cele două componente și menținerea fixă a lor în timpul injectării.

Proiectarea concentratorului adaptor de undă la o frecvență de 34 sau 35 kHz ar putea determina atingerea frecvenței de rezonanță (40 kHz) în momentul închiderii matriței cu o anumită forță. Această soluție ar fi posibilă numai cu condiția înlocuirii generatorului ultrasonic nominal cu unul universal a cărui frecvență de lucru să poată fi aleasă dintr-o paletă mai largă de valori.

Folosirea unui sistem de control automatizat pentru reglarea presiunii presupune folosirea unui controler PID (proporțional-integral-derivat) pentru a

menține presiunea de închidere a matriței la un nivel constant pe tot parcursul procesului. Controlerul PID reprezintă un sistem de control de răspuns cu buclă închisă care are ca scop calcularea diferenței între valoarea măsurată și valoarea impusă a unui parametru de proces. În cazul de față, parametrul de proces este presiunea de închidere a matriței, parametru care va fi reglat la o valoare care să nu permită creșterea frecvenței de rezonanță a convertorului ultrasonic în afara limitelor admise de generatorul ultrasonic, dar care să îngăduie în același timp menținerea închisă a matriței pentru a permite materialului să umple cavitatea de formare. Un asemenea sistem de control automatizat ar necesita montarea unui traductor de presiune pe platoul fix al matriței și instalarea unui sistem automatizat de comandă a presiunii. Astfel, în cazul în care traductorul de presiune va înregistra o scădere a presiunii cauzată de tendința concentratorului de a se depărta de corpul reflector sub acțiunea materialului polimeric injectat, controlerul PID va procesa acest semnal și va trimite semnale la sistemul automatizat de comandă al grupului pneumatic pentru a mări valoarea presiunii generate de el. Controlul de răspuns cu buclă închisă presupune reluarea acestui ciclu de înregistrare de valori ale presiunii și comandă a sistemului pneumatic până când traductorul va înregistra valoarea impusă a presiunii (figura 5.20).

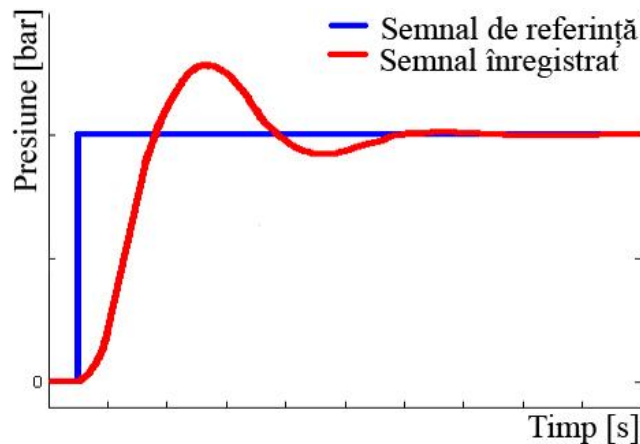


Fig. 5.20. Reglarea automată a presiunii

Pentru a putea duce la bun sfârșit încercările experimentale, s-a hotărât înlocuirea generatorului ultrasonic de frecvență nominală fixă cu un generator universal manual de laborator. Substituirea efectuată nu a reprezentat decât un compromis de moment, frecvența de lucru a generatorului universal trebuind a fi ajustată la fiecare încercare experimentală, lucru imposibil de realizat în cazul unor seturi de experimente mai laborioase.

Rezultatele experimentale consemnate în tabelul 5.2 au făcut obiectul programului de analiză statistică a parametrilor de proces Minitab. Pe baza interpretărilor formulate de acesta s-au putut desprinde următoarele concluzii:

- În cazul absenței activării ultrasonice, niciunul dintre cei trei factori de proces (presiunea de injectare, temperatura matriței și temperatura de injectare) nu are un efect semnificativ asupra lungimii spiralei injectate (fig. 5.21);

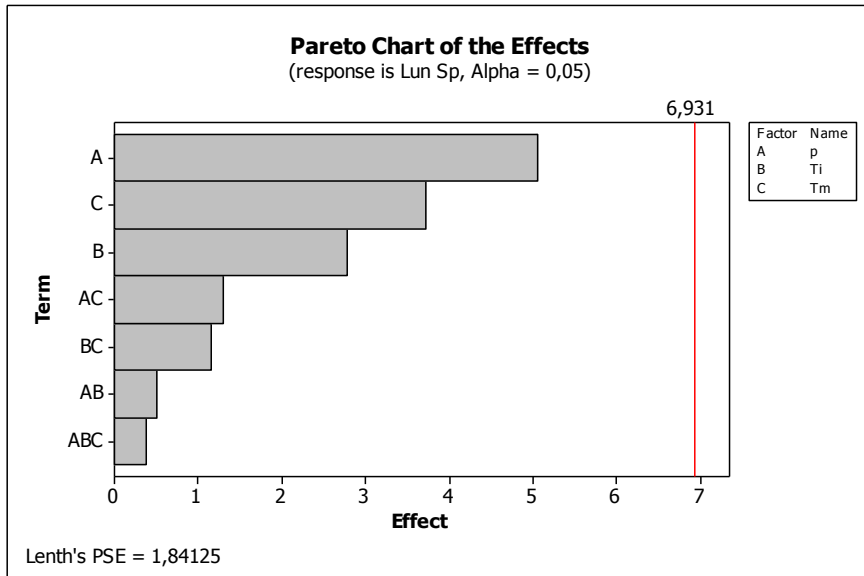


Fig.5.21. Influența parametrilor de proces în absența activării ultrasonice

- Activarea ultrasonică, chiar dacă are factorul cel mai mic de impact dintre toți parametrii de proces, are meritul de a-i eficientiza pe ceilalți, contribuind astfel decisiv la umplerea cu material a cavității de formare în formă de spirală (fig. 5.22);

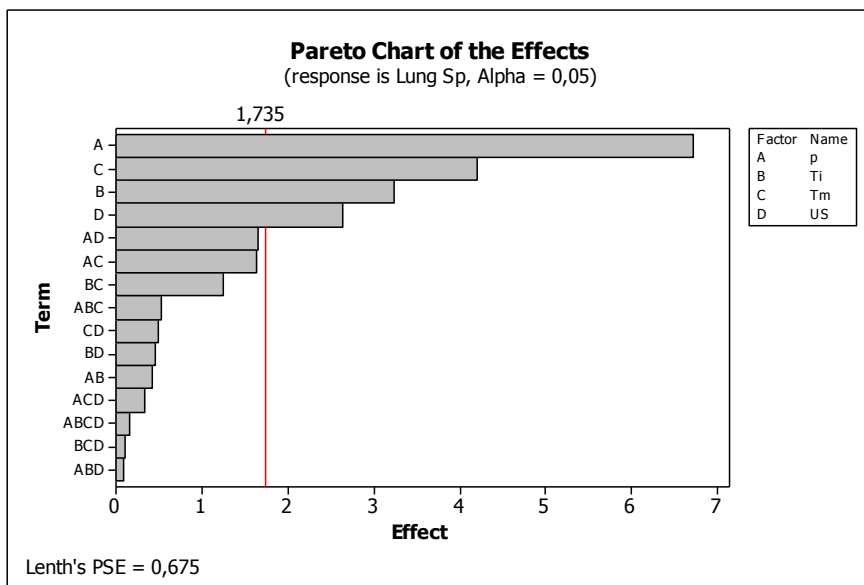


Fig.5.22. Influența parametrilor de proces în prezența activării ultrasonice

- Creșterea valorilor presiunii de injectare, a temperaturii de injectare și a temperaturii matriței precum și prezența activării ultrasonice influențează pozitiv gradul de umplere a cavității de formare cu material

polimeric. Legile de variație ale lungimii spiralei injectate în funcție de acești parametri sunt ilustrate în figura 5.23.

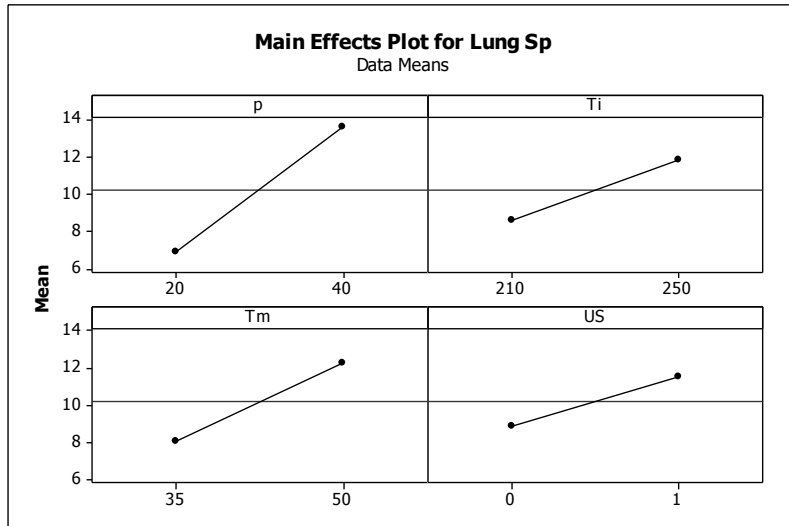


Fig. 5.23. Legile de variație ale lungimii spiralei

- Lipsa interacțiunilor de ordinul doi între parametrii de proces în intervalul lor de variație (figura 5.24).

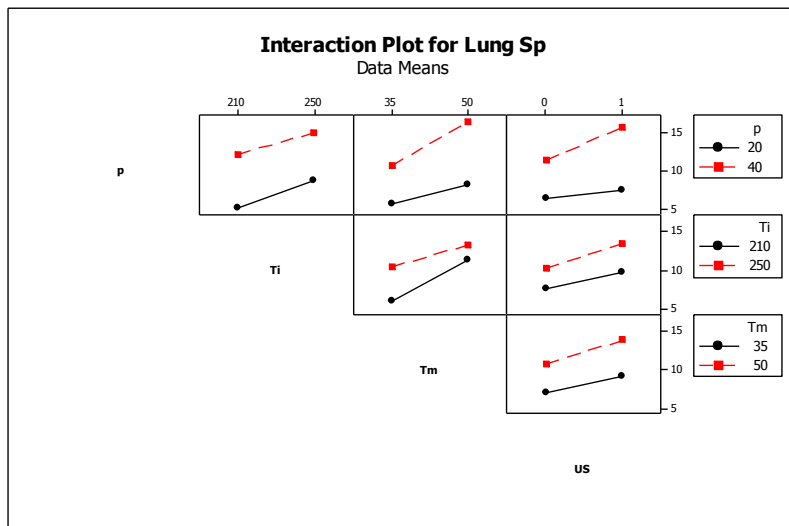


Fig. 5.24. Interațiunile existente între parametrii procesului

- Valorile combinațiilor de câte doi parametri pentru care se obțin diferite valori ale lungimii spiralei injectate ne-au fost furnizate de către program, ele fiind prezentate în figurile 5.25 (variantea bidimensională), respectiv 5.26 (versiunea tridimensională). Se observă că valorile

maxime ale lungimii spiralei injectate se obțin pentru valori maxime ale factorilor de control.

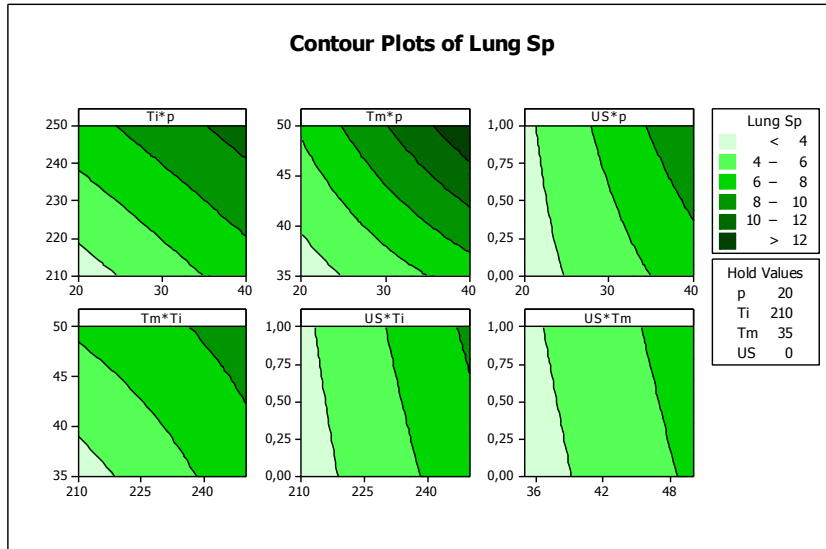


Fig. 5.25. Valorile parametrilor de proces pentru diferite valori ale lungimii spiralei (2D)

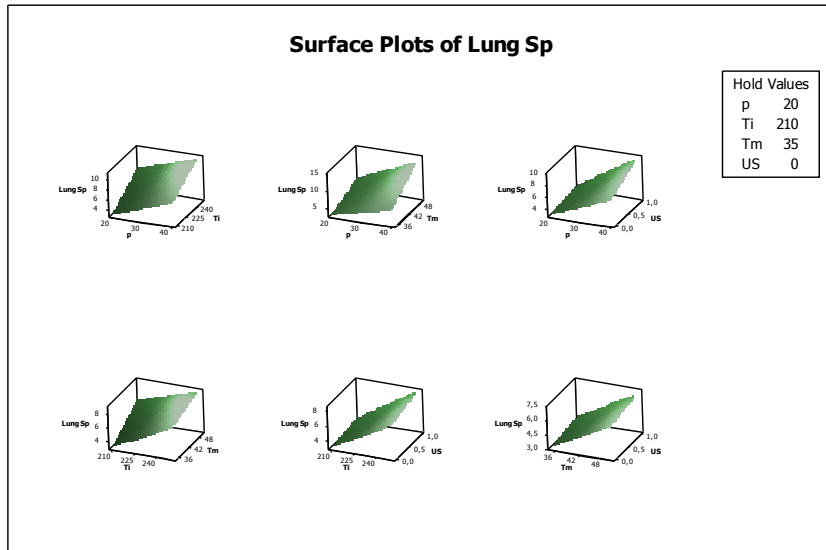


Fig. 5.26. Valorile parametrilor de proces pentru diferite valori ale lungimii spiralei (3D)

- În final, programul ne oferă combinația optimă de valori ale parametrilor pentru care se obține lungimea maximă a spiralei injectate (figura 5.27).

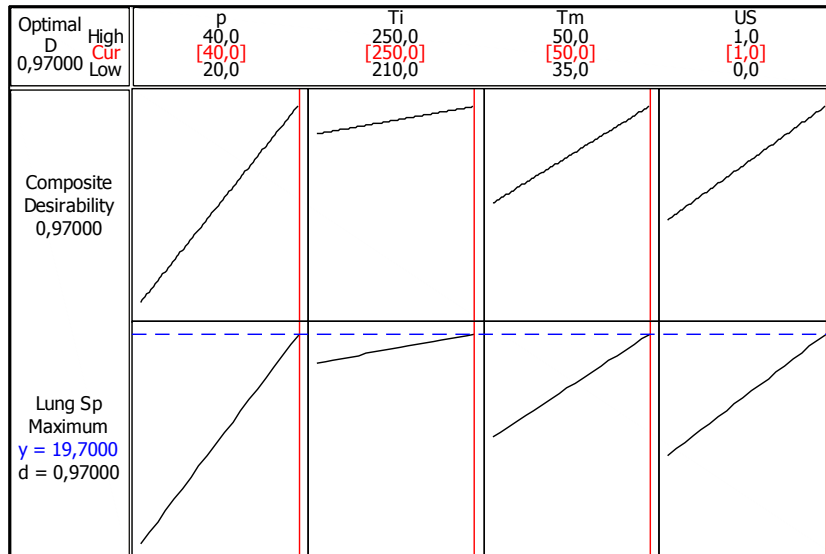


Fig. 5.27. Valorile optime pentru parametrii de proces

Soluția optimă în cazul absenței activării ultrasonice conferea un grad de umplere al cavităților matriței egal cu 43%, considerat a fi nesatisfăcător, toți factorii de proces dovedindu-se a fi ineficienți (figura 5.28).

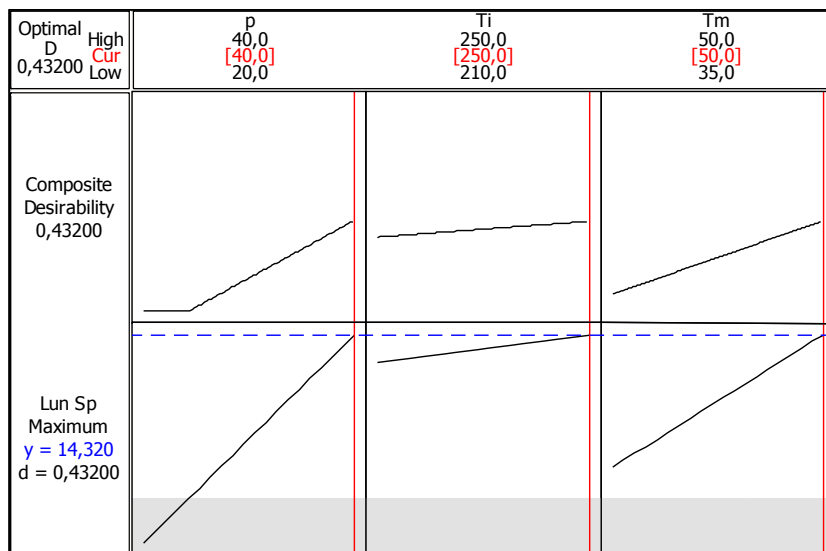


Fig. 5.28. Gradul de umplere al matriței în absența activării ultrasonice

Chiar dacă reprezintă factorul de proces cu cel mai scăzut rang de impact, prezența activării ultrasonice a microinjectării determină un grad de umplere al cavităților matriței egal cu 97% (figura 5.27), de peste două ori mai mare decât în cazul soluției optime fără activare ultrasonică.

6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1. Concluzii

În conformitate cu obiectivul fixat în cadrul cercetării doctorale realizate prin prezenta teză, s-a definit o platformă experimentală constituită din proceduri și echipamente care să fie suficient de flexibile în utilizare și adaptabile unor condiții specifice de experimentare care vizează activarea ultrasonică a **microinjectării**, respectiv a formării (prin injectare sau extrudare) pieselor cu **pereți subțiri**.

Componentele principale ale platformei experimentale sunt:

- Ansamblul ultrasonic de activare constituit din generator de ultrasunete tip Branson 2000LP (caracterizat printr-o frecvență de funcționare de 40 kHz și o putere de 150 W), convertor ultrasonic piezoelectric de 40 kHz și concentrator adaptor de undă proiectat în $\lambda/2$ sau $2 \times \lambda/2$, din C45 și cu coeficient teoretic de amplificare $K_t = 1,77$;
- Celulă de activare tip cap de extrudare cu activare ultrasonică transversală în zona centrală pentru studiul influenței acțiunii energiei ultrasonice la formarea pieselor cu pereți subțiri (construcție Ecole des Mines de Douai);
- Celulă de activare tip injectare centrală pentru matrița de microinjectare (construcție Universitatea „Politehnica” din Timișoara);
- Echipament experimental pe structura constructivă a mașinii de injectat DK Codim 200-600 Verticale (construcție Ecole des Mines de Douai);
- Mașină de injectat experimentală cu acționare hidraulică utilizată pentru diferite adaptări constructive ale matrițelor activate ultrasonic (construcție Universitatea „Politehnica” din Timișoara).

Activarea ultrasonică a **microinjectării** materialelor polimerice s-a dovedit a fi o soluție viabilă în vederea ameliorării capacității de umplere a cavităților de formare și a îmbunătățirii calității pieselor injectate. Acțiunea energiei ultrasonice focalizată în planul de separație al matriței de microinjectare a minimalizat neajunsurile specifice acestui procedeu.

Inovația adusă de prezenta lucrare constă în adaptarea constructivă a unei soluții de activare ultrasonică a unei matrițe pentru microinjectare prezentată într-un brevet de invenție la nivel teoretic. Încercările experimentale realizate au condus la validarea soluției oferite de brevet cu posibilități de ameliorare de ordin constructiv.

Activarea ultrasonică a curgerii materialelor polimerice la **injectarea pieselor cu pereți subțiri** s-a materializat prin influențarea semnificativă a unui important parametru de proces, în speță presiunea de curgere.

Studiile și experimentele specifice microinjectării și injectării pieselor cu pereți subțiri pe platforma experimentală definită în teză constituie fundamentări și confirmări ale interesului tehnic și științific al activării ultrasonice, aplicând perspective concrete pentru dezvoltări ulterioare focusate pe aplicații tipice în special în domeniul microinjectării.

6.2. Contribuții personale

- Realizarea unui **studiu de sinteză și analiză** cu privire la undele ultrasonice, mărimile fizice care le caracterizează, construcția sistemelor ultrasonice, elementele lor componente și adaptarea lor la diferite procedee de punere în formă a materialelor polimerice;
- Concepția și realizarea unui **sistem ultrasonic** caracterizat printr-un coeficient efectiv de amplificare a amplitudinii de oscilație $K_{ef} = 1,77$ și compus dintr-un generator ultrasonic având o frecvență de lucru de 40 kHz și o putere de 150 W, un transductor piezoelectric, un concentrator adaptor de undă și un corp reflector, ambele proiectate în $\lambda/2$, sistem conceput să activeze procedeul de microinjectare a materialelor polimerice;
- Proiectarea și realizarea unei **matrițe pentru microinjectare** activată ultrasonic, adaptare a soluției propuse de brevetul de invenție BV România 00838/2007;
- Concepția și realizarea unui **sistem ultrasonic** caracterizat printr-un coeficient efectiv de amplificare a amplitudinii de oscilație $K_{ef} = 1,77$ și compus dintr-un generator ultrasonic având o frecvență de lucru de 40 kHz și o putere de 150 W, un transductor piezoelectric cu sistem de răcire integrat și un concentrator adaptor de undă proiectat în $\lambda/2$, sistem menit să activeze procedeul de injectare a pieselor cu pereți subțiri;
- Adaptarea unei **duze reologice** cu rol de celulă de măsură pentru a permite activarea ultrasonică a curgerii la injectarea pieselor cu pereți subțiri pe presa de injectat DK Codim 200-600 Verticale;
- Realizarea unor **seturi de încercări experimentale de microinjectare** activată ultrasonic a polietilenei de înaltă densitate;
- Realizarea unor seturi de încercări experimentale având ca scop studiul comportamentului la curgere al polipropilenei la injectarea pieselor cu pereți subțiri;
- Realizarea unor **planuri de experimente factoriale** pentru a pune în evidență factorul de impact al fiecărui parametru de injectare;
- Realizarea unei creșteri a gradului de umplere al unei cavități de formare pentru o matriță de microinjectare de la 43% la 97% prin activarea ultrasonică a procesului.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

- Studiul comportamentului mai multor materiale polimerice supuse activării ultrasonice în timpul procesării lor;
- Găsirea unor noi soluții constructive personalizate pentru fiecare stand experimental în parte care să eficientizeze activarea ultrasonică a diferitelor procedee de punere în formă a materialelor polimerice;
- Definirea unor soluții tehnice pentru aplicații industriale pe principiul raportului optim între efectele obținute și costurile realizate.

7. BIBLIOGRAFIE

1. [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
2. [ACH 83] Achimescu N., *Studiul comparativ al generării suprafețelor prin eroziune electrică cu și fără influența proceselor de evacuare*, A 4-a conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983
3. [AMZ 04] Amza G., ș.a., *Tratat de tehnologii neconvenționale*, vol. VIII, Prelucrarea prin eroziune ultrasonică, Editura Bren, București, 2004
4. [AMZ 06] Amza G., *Ultrasunetele. Aplicații active*, Editura AGIR, București, 2006
5. [AMZ 88] Amza G. și colab., *Sisteme ultraacustice*, Editura Tehnică, București, 1988
6. [AMZ 98] Amza G., *Sisteme ultraacustice*, Editura Tehnică, București, 1998
7. [AST 81] Astașev V.K., Babițkii V.J., *Calculul concentratorilor tije cu sarcină neliniară*, Akusticeski Jurnal, nr. 6, URSS, 1981
8. [AST 81] Astașev V.K., Babițkii V.J., *Eficiența acordării la rezonanță a sistemelor de prelucrare cu ultrasunete*, Mașinovedenie, nr. 6, URSS 1981
9. [ATA 77] Atanasiu N., Radu C., Amza G., *Calculul și proiectarea profilului optim al concentratoarelor*, Construcția de mașini, 29, nr. 2-3, 1977
10. [BAL 67] Balamuth L., *Energy storage in high frequency vibratory devices*, Brevet de invenție, 1967
11. [BĂD 67] Bădarău E., Grumăzescu M., *Ultraacustică fizică și tehnică*, Editura Tehnică, București, 1967
12. [BEY 69] Beyer R.T., Letcher S.V., *Physical Ultrasonics*, Academic Press, New York, 1969
13. [BOG 81] Bogomolov S.N., Simson E.A., *Proiectarea optimă a concentratoarelor de oscilație de ultrasunete*, Akusticeski Jurnal, vol. 27, nr. 4, URSS, 1981
14. [BUL 07] Bulychev N. et all, *Sound dispersions*, European Coatings Journal, Issue 3, 2007
15. [BUJ 06] Buțu L., *Contribuții teoretice și experimentale privind curățirea cu ultrasunete a echipamentelor de mare precizie*, Teză de doctorat, București, 2006
16. [BUZ 75] Buzdugan G., Fetcu L., Radeș M., *Vibrațiile sistemelor mecanice*, Editura Academiei, București, 1975
17. [BUZ 79] Buzdugan G., Mihăilescu E., Radeș M., *Măsurarea vibrațiilor*, Editura Academiei București, 1979
18. [CAO 02] Cao Y., Li H., *Influence of ultrasound on the processing and structure of polypropylene during extrusion*, Polymer Engineering and Science, vol. 42, Issue 7, 2002
19. [CHE 02] 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
20. [CHE 02] Chen G., Guo S., Li H., *Ultrasonic improvement of rheological behavior of polystyrene*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 84, Issue 13, 2002
21. [CHE 06] Chen Y., Li H., *Effect of ultrasounds on the viscoelasticity and rheology of polystyrene extruded through a slit die*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 100, Issue 4

22. [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, 2007
23. [CHI 80] Chivers R.C., *Fluctuațiile undelor acustice în mediile neomogene*, Jurnal of Physics - D Applies Physics 13, nr. 11, Marea Britanie, 1980
24. [CIO 11] Cioană C., Tulcan A., Dume A., Șerban I., *Flow Simulation on a Reverse Engineered Part*, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, MoldTech 2011
25. [CLE 89] Cleșiu S.R., *Studiul și tendințele de dezvoltare ale sudării cu ultrasunete a materialelor plastice și a metalelor*, Editura OID - ICM, București, 1989
26. [COS 11] Cosma C., Rotar D., Cioană C., Șerban I., *Redesigning plastic products*, Revista Materiale Plastice, vol. 48, Issue 3, 2011
27. [CRE 91] Crețu-Nica M., *Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă și a sistemelor acustice rezonante*, Teză de doctorat, Timișoara, 1991
28. [DAT 71] Date E.H.F., Atkins M., Beaton W., *Measurement of the elasticity and ultrasound velocities of steel*, Ultrasonics, Octombrie 1971
29. [DER 05] Derdouri A., Ilinca F., Hétu J.F., *Microinjection molding of microstructures - Experimental and numerical simulation*, IMI/NRC, Boucherville, Quebec, 2005
30. [DRĂ 83] Drăgan O., Iancu C., ș.a., *Ultrasunete de mari energii*, Editura Academiei RSR, București, 1983
31. [EIS 65] Eisner E., Seager J.S., *A longitudinally resonant stub for vibrations of large amplitude*, Ultrasonics, Aprilie - Iunie, 1965
32. [ENS 73] Ensminger D., *Ultrasonics, the low and the high intensity application*, Marcel Dekker Inc., New York, 1973
33. [FAI 74] Fairbanks H.V., *Applying ultrasounds to the moulding of plastic powders*, Ultrasonics, 1974
34. [GHA 06] Gharagheizi F., Angaji M.T., *Scaling Approach for Thin Wall Injection Moulding by Dimensional Analysis*, Iranian Polymer Journal, vol. 15, nr. 1, 2006.
35. [GRE 80] Green R.E., *Efectul microstructurilor metalice asupra atenuării ultrasonice*, Jurnal of metals 32, nr. 8, SUA, 1980
36. [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), 2003
37. [IAN 99] Iancu I., *Contribuții privind prelucrarea cu ultrasunete a discurilor optice din sticlă și a lentilelor de safir*, Teză de doctorat, Timișoara, 1999
38. [ICL 03] Iclănzan T.A., Stan D.V., *Matriță de injectare cu canale calde activată ultrasonic*, Brevet de invenție nr. 118400B BOPI, nr. 5/2003
39. [ICL 03] Iclănzan T.A., Stan D.V., *Procedeu și cap de extrudare cu activare ultrasonică*, Brevet de invenție nr. 11857B BOPI, nr. 7/2003
40. [ICL 05] Iclănzan T., Stan D., *Ultrasonic activation limits in the thermoplastics injection and extrusion*, Revista Materiale Plastice, 2005
41. [ICL 06] Iclănzan T.A., Stan D.V., *Matriță de injectare cu canale calde activată ultrasonic*, Brevet de invenție nr. 00792/2006
42. [ICL 06] Iclănzan T.A., Stan D.V., *Matriță de injectare cu canale calde activată ultrasonic*, Brevet de invenție nr. 00793/2006

43. [ICL 08] Iclănzan T., Stan D., Abadie M., *A possible new ultrasonic thermo-pellicular effect and applications*, ESAFORM 2008, Conference on Material Forming, Lyon, Franța, 2008
44. [ICL 10] Iclănzan T., Șerban I., Rotar D., Juț V., *Ultrasonic activation, a possible alternative application in microinjection moulding*, International Journal of Material Forming, vol. 3, sup. 1, 2010
45. [ICL 89] Iclănzan T., Jula G., *Metodă experimentală și unele rezultate ale activării ultrasonice a procesului de ambutisare*, A doua Conferința națională de tehnologii și utilaje pentru prelucrarea materialelor prin deformare plastică la rece, Cluj, 1989
46. [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, 2005
47. [KEM 00] Kemmann O., Weber L., e.a., *Simulation of the micro-injection molding process*, SPE ANTEC, 2000
48. [KUT 91] Kuttruff, H., *Ultrasonics - Fundamentals and applications*, Elsevier Appl. Sci., Paris, 1991
49. [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, 2004
50. [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, 2006
51. [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 Comission of Acoustics, București, 2007
52. [LUC 07] Luchian C., *Contribuții teoretice și experimentale privind sudarea cu ultrasunete a materialelor compuse*, Teză de doctorat, București, 2007
53. [MAR 72] Markov A.I., Ustinov I.D., *A study of the ultrasonics diamond drilling of non-metalic materials*, Industrial Diamond Review, Marea Britanie, 1972
54. [MER 57] Merkulov L.C., *Raschet ultrazvukovuykn kontsentratorov*, Akustichskiy Zhurnal, nr. 3, Tom III, Moscova, 1957
55. [MOR 64] Mori E., *Analysis of ultrasonic exponential solid horn with a tool and its design considering fatigue limit*, Bulletin of the Tokyo Institute of Technology, nr. 43, 1964
56. [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, 2005
57. [NAN 95] Nani V.M., *Activarea cu ultrasunete a proceselor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform*, Teză de doctorat, Timișoara 1995
58. [NIC 83] Nichici A., Popovici V., Nica M., Achimescu N., Popa H., Paulescu G., *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*, Editura Facla, Timișoara 1983
59. [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, 2009

60. [OJH 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), 2003
61. [ONO 76] Ono, A., *Analiza oscilațiilor unei scule ultrasonice prin metoda difracției fascicolului LASER*, Cirp Annalen, Elveția, 1976
62. [PĂU 08] Păușan D.V., *Contribuții teoretice și experimentale privind sudarea cu ultrasunete a unor combinații de materiale*, Teză de doctorat, București, 2008
63. [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, 2007
64. [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, 2006
65. [ROT 10] Rotar D., Cosma C., Țuț V., Șerban I., *Algorithm for Realization of a Die Used in Micro Injection Molding*, Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium „Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Interdisciplinary Solutions”, 2010
66. [ROT 10] Rotar D., Cosma C., Țuț V., Șerban I., *Rapid Prototyping for a Microinjection Moldong Die*, Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Energy, Enviroment, Ecosystems & Sustainable Developement, 2010
67. [ROZ 71] Rozenberg L.D., *High Intensity Ultrasonic Field*, Plenum Press, New York, 1971
68. [ROZ 73] Rozenberg L.D., *Physical principles of ultrasonic technology*, vol. I, II, Plenum Press, NY 1973
69. [SCH 03] Schinkothe W., *Temperierkonzepte fur das mikrospritzgiessen im vergleich/A comparison of temperature regulating concepts for injection moulding of parts with microstructures*, 18-te. Stuttgarter-Kolloquium, 2003
70. [SIL 68] Silaș G., *Mecanica. Vibrații mecanice*, Eitura Didactică și pedagogică, București, 1968
71. [SÎR 08] Sîrbu N.A., Iclănzan T., Oancă O., *Construction particularities of the ultrasonic equipments for flow activation of polymeric media, in the extrusion-injection processes*, Revista BID, nr. 4/2008
72. [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
73. [SÎR 09] Sîrbu A.N., *Cercetări teoretice și experimentale privind activarea cu ultrasunete a proceselor de curgere a materialelor polimerice*, Teză de doctorat, Timișoara, 2009
74. [SÎR 10] Sîrbu A., Stan D., Șerban I., Oancă A., *Overview on the Ultrasonic Applications in the Polymeric Materials Processing*, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, vol. 55(69), Iss. 2, 2010
75. [SMI 98] Smialek D., Simpson C.L., *Thin Wall Injection Moulding*, Special Molding Techniques, 1998
76. [STA 00] 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, 2000

77. [STA 01] Stan D., Iclănzan T., Abadie M., *Applications de l'effet thermo-pelliculaire de surface*, Buletinul Științific al Universității „Politehnica” Timișoara, Seria Chimie și Ingineria Mediului, tom 46(60), 2001
78. [STA 02] Stan D., Turc C., Tulcan A., *Evaluation de l'activation par ultrasons comme facteur d'influence sur les propriétés d'écoulement des polymères fondus sous pression*, Buletinul Științific al Universității „Politehnica” Timișoara, tom 47(61), fascicula 1, 2002
79. [STA 02] Stan D., Tulcan A., s.a., *Considerations theoriques concernant les propriétés rhéologiques des polymères fondus*, Buletinul Științific al Universității „Politehnica” Timișoara, tom 47(61), fascicula 1, 2002
80. [STA 03] Stan D., *Aplicații ale ultrasunetelor în procesarea materialelor polimerice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2003
81. [STA 03] Stan D., Iclănzan T., *Algorithme du control de la qualité des produits injectés*, Revista Academic Journal of Manufacturing Engineering - AJME, vol. 1, nr. 4, 2003
82. [STA 03] Stan D., Tulcan A., Turc C., *The modification of the crystallinity rate of the polymers injected/extruded under ultrasonic activation*, Conferința Internațională a TMCR 2003, Editura UTM Chișinău, vol. II, 2003
83. [STA 10] Stan D., Șerban I., Tulcan L., Turc C., Tulcan A., *Thermoplastics Extrusion Die with Ultrasonic Thermo-Pellicular Effect*, Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems & Sustainable Development, 2010
84. [STA 84] Stanomir D., *Sisteme electroacustice. Câmpul, radiația și transducția*, București, Editura Tehnică, 1984
85. [STA 99] Stan D., *Studiul activării ultrasonice a proceselor de injectare și extrudare a materialelor termoplastice*, Teză de doctorat, Timișoara, 1999
86. [ȘER 11] Șerban I., Stan D., Iclănzan T., Sîrbu A., *Ultrasonic Activation of Microinjection Molding*, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, MoldTech 2011
87. [ȘER 11] Șerban I., Stan D., Rotar D., Juț V., *Techniques to Obtain Different Molding Runners Dies Used in Micro-Injection Molding*, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, MoldTech 2011
88. [TES 62] Tesche W.J., *Ultrasonic cutting tool*, Brevet de invenție, 1962
89. [THE 74] Thews von H., *Hinweise für die Sonotroden - Herstellung im Werkzeugbau des Anwenders*, Verbindungstechnik, Ingenieur Digest Verlagsgesellschaft, 1974
90. [TIH 80] Tihonravov A.V., *Despre formarea optimă a concentratorilor de ultrasunete*, Akusticeski Jurnal, vol. 26, nr.2, URSS, 1980
91. [VAV 80] Vaver V.P., Goliamina I.P., Hlopotunova N.A., *Sisteme de oscilații de ultrasunete cu concentratoare din diferite materiale*, Akusticeski Jurnal, vol. 26, nr.4, URSS, 1980
92. [VOL 02] Voloșenco C., *Implementarea în industrie a ultrasunetelor de putere*, Editura Matrix Rom, București, 2002
93. [WAN 01] Wang Q., Xia H., Zhang C., *Preparation of polymer/inorganic nanoparticles composites through ultrasonic irradiation*, Journal of Applied Polymer Science, vol. 80, 2001
94. [WIE 10] Wietzke et al., *On the threshold of industrial application*, Kunststoffe international 4, 2010
95. [WUH 05] Wu H., Guo S., Li Z., *Effect of ultrasonic oscillations on linear viscoelastic behaviours of metallocenecatalyzed linear low density*

- polyethylene and its blends with low density polyethylene*, Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, vol. 43, Issue 21, 2005
96. [ZAN 72] Zanker A., *Nomograph for the velocity of sound in solid media*, Ultrasonics, Iulie 1972
97. clangsonic.en.alibaba.com
98. www.branson.com
99. www.fycg.com
100. www.krell-engineering.com
101. www.ndt-ed.org
102. www.sonica-us.com
103. www.ultramelt.org
104. www.ultrasonicwelding.org
105. www.ultrasuoni.fr
106. www.wikipedia.org
107. Bv. No. 118576 B/2003 Romania "*Matriță de injectare activată ultrasonică*"
108. Bv. No. 118400 B/2003 Romania "*Procedeu și cap de extrudare activat ultrasonic*"
109. Bv. No. 2000271971/2000 Japon "*Sprueless miniature runner type mold applying ultrasonic energy*"
110. Bv. No. 2000271971/2000 Japon "*Sprueless miniature runner type mold applying ultrasonic energy*"
111. Bv. 2001001370/2001 Japon "*Ultrasonic injection mold*"
112. Bv. 3161317/1991 Japon "*Injection compression mold*"
113. Bv. 2001062878/2001 Japon "*Ultrasonic injection mold for optical disk*"
Bv. 6,464,485 B1/2002 USA "*Ultrasonic injection mold for an*