



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



UNIVERSITATEA
TEHNICĂ
DIN CLUJ-NAPOCA



Contribuții privind îmbunătățirea calității pieselor miniaturale sau cu pereți subțiri obținute prin injectare activată ultrasonic

Teză destinată obținerii

titlului științific de doctor inginer

la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ

de către

Ing. Andrei ADAM

Conducător științific: prof.dr.ing. Tudor Iclănzan

Prefață

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Facultății de Mecanică, la Catedra de Ingineria Materialelor și a Fabricației a Universității POLITEHNICA din Timișoara. Lucrarea se adresează tuturor celor interesați a cunoaște aspectele legate de îmbunătățirea calității a pieselor miniaturale și cu pereți subțiri obținute prin activare ultrasonică.

Doresc să îmi exprim respectul și întreaga mea considerație pentru domnul prof.dr.ing. Tudor Iclănzan, conducătorul științific al tezei mele de doctorat și cel care m-a îndrumat spre alegerea acestei teme de doctorat. Pentru acceptarea mea ca doctorand, pentru sprijinul și îndrumarea sa de înalt nivel științific, pentru sugestiile și indicațiile metodologice prețioase, atât în stagiile de pregătire și cercetare, cât și în faza finală de elaborare și redactare a tezei de doctorat, îmi exprim, pe această cale, cele mai sincere mulțumiri.

Mulțumiri deosebite se cuvin și domnului conf.dr.ing. Daniel Stan și domnului conf.dr.ing. Aurel Tulcan, din cadrul Departamentului de Ingineria Materialelor și a Fabricației, al Universității POLITEHNICA Timișoara, pentru coordonarea la partea experimentală și teoretică a prezentei lucrări, pentru profesionalismul domniilor sale, simțul practic, sugestiile și ideile oferite, cu multă amabilitate, în problemele teoretice dar și practice, idei care mi-au fost de un real folos la analiza și interpretarea datelor experimentale din această teză.

Îmi exprim întreaga considerație și gratitudine față de membrii comisiei: domnul prof.dr.ing. Gheorghe Achimaș, domnul prof dr. ing. Octavian Bologa și domnul conf.dr.ing. Danuț Soșdean pentru acceptul de a fi membrii ai Comisiei de doctorat și pentru sugestiile și observațiile făcute, care au contribuit la îmbunătățirea calitativă a acestei teze.

Mulțumesc familiei mele, respective mamei, Anica și soției Alina, care au stat tot timpul alături de mine, sprijinindu-mă și ajutându-mă pe întreaga perioadă de realizare a tezei de doctorat, dând dovadă de înțelegere și răbdare.

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013. Axa prioritară: 1 „Educația și formarea profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere” Domeniul major de intervenție: 1.5 „Programe doctorale și postdoctorale în sprijinul cercetării”. Titlul proiectului: „Parteneriat interuniversitar pentru excelența în inginerie - PARTING”. Cod Contract: POSDRU/159/1.5/S/137516. Beneficiar: Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

CUPRINS

PREFAȚĂ	2
ABREVIERI	8
CAPITOLUL 1	9
INTRODUCERE	9
1.2. NOȚIUNI GENERALE DESPRE PRINCIPALELE MATERIALE POLIMERICE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AUTO	10
1.2.1. Poliamida – PA [ELI03]	10
1.2.2. Acrilonitril-butadien-stiren - ABS [MUC92]	10
1.2.3. Polibutilentereftalat – PBT [MUC92].....	11
1.2.4. Policarbonat - PC [McC89].....	12
1.2.5. Poliacetal – POM [McC89].....	12
1.2.6. Polimetacrilat de metil – PMMA [BAR71]	13
1.2.7. Polifenilenoxid - PPO, PPE [NAG93]	13
1.2.8. Polifenilensulfura – PPS [EHR95].....	13
1.2.9. Polieterimid - PEI [MUC92].....	14
1.2.10. Polietersulfona si Polisulfona - PES și PSU	14
1.2.11. Polieterestercetona - PEEK [WHI75]	15
1.2.12. Polyphthalamide - PPA.....	16
1.3. INJECTAREA MATERIALELOR PLASTICE POLIMERICE.....	17
1.3.1. Principiul injectării materialelor plastice	17
1.3.2. Procesul matrițării prin injectare.....	18
1.3.3. Factori care influențează procesul de injecție	19
1.4. SINTEZĂ A PRINCIPALELOR DEFECTE CARE APAR LA PIESELE POLIMERICE PRODUSE PRIN INJECTARE	21
1.4.1. Piesă cu goluri de aer [OKE93]	21
1.4.2. Probleme de fragilitate și degradare a materialului [ZHA03].....	22
1.4.3. Piesă arsă.....	24
1.4.4. Fisurarea/Crăparea	25
1.4.5. Delaminare sau exfoliere	25

1.4.6. Variația dimensională a piesei	27
1.4.7. Decolorarea piesei	28
1.4.8. Variații de greutate	29
1.4.9. Ochi de pește	29
1.4.10. Bavuri în planul de separație.....	30
1.4.11. Linii de curgere concentrice, radiante din punctul de injectare	31
1.4.12. Probleme privind urme de jet in piesă	32
1.4.13. Probleme privind injectarea rapidă/de scurtă durată (short shot)	33
1.4.14. Goluri interioare și retasuri	34
1.4.15. Linii de sudură și linii de întâlnire	36
1.4.16. Probleme de deformare	37
1.4.17. Umplere incompletă a matriței.....	39
1.4.18. Con tracția volumetrică	41
1.4.19. Probleme datorate efortului la forfecare [CRO79]	41
1.4.20. Acumulare de material	42
1.5. CONCLUZII	44
CAPITOLUL 2	45
CERCETARE TEORETICĂ PRIVIND CORELAREA DINTRE TEHNICA MICROINJECTĂRII ȘI INJECTAREA PIESELOR CU PEREȚI SUBȚIRI CU TEHNICA SIMULĂRII COMPUTERIZATE A CURGERII ÎN SPAȚIILE CUIBULUI MATRIȚEI ȘI CU ANALIZA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR CE INFLUENȚEAZĂ UMLPEREA CAVITĂȚII.....	45
2.1. DEFINIREA INJECTĂRII PIESELOR MINIATURALE ȘI CU PEREȚI SUBȚIRI.....	45
2.2. PIESE OBȚINUTE PRIN MICRO INECȚIE	46
2.3. DIMENSIUNILE MINIMALE OBTENABILE ALE UNUI CUIB AL MATRIȚEI FOLOSIT LA FABRICAREA UNOR PIESE MINIATURALE [YU04]	49
2.3.1. Proiectarea și fabricarea matriței [YU04]	49
2.3.2. Simularea umplerii matriței [YU04]	51
2.3.3. Rezultate experimentale [YU04]	54
2.3.4. Concluzii	55
2.4. STRATEGII DE IMPLEMENTARE ȘI SIMULARE COMPUTERIZATĂ FOLOSITE PENTRU OPTIMIZAREA PROCESULUI DE INJECTARE AL PIESELOR MINIATURALE ȘI CU PEREȚI SUBȚIRI APPLICATE ÎN VEDEREA OBȚINERII UNEI CALITĂȚII MAI BUNE A PRODUSELOR [TOS10]	55

2.4.1. Validarea experimentală prin realizarea efectivă a pieselor miniaturale [TOS10].	56
2.4.2. Validarea experimentală prin simularea cu ajutorul unui software a pieselor miniaturale [TOS10].	58
2.4.2.1. Modelarea piesei [TOS10]	59
2.4.2.2. Implementarea dependenței timpului de curgere [TOS10]	60
2.4.3. Concluzii	62
2.5. ANALIZA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR CE INFLUENȚEAZĂ CALITATEA UMPLERII MATRIȚELOR PENTRU PIESE MINIATURALE ȘI CU PEREȚI SUBȚIRI [ATT 09]	63
2.5.1. Concluzii	72
CAPITOLUL 3	73
OBIECTIVELE TEZEI	73
CAPITOLUL 4	76
STUDIUL UNUI MODEL EXPERIMENTAL PENTRU IDENTIFICAREA PARAMETRILOR DE INFLUENȚĂ LA INJECTAREA ULTRASONICĂ A PIESELOR MINIATURALE SAU CU PEREȚI SUBȚIRI	76
4.1. COMPORTAMENTUL REOLOGIC AL TOPITURILOR DE POLIMER ÎN SPAȚII DE DIMENSIUNI REDUSE ALE MATRIȚEI.	76
4.1.1. Vâscozitatea topiturii de polimer	76
4.1.2. Fluid newtonian. Fluid non-newtonian	77
4.1.3. Reducerea rezistenței la forfecare	78
4.1.4. Distribuția vitezei de forfecare în secțiunea de curgere	79
4.1.5. Parametrii de influență asupra comportamentului reologic a topiturii de polimer	81
4.2. EFECTELE TEMPERATURII ȘI PRESIUNII ASUPRA TOPITURII DE POLIMER	82
4.3. ACTIVAREA ULTRASONICĂ	84
4.3.1. Definierea principiului de activare	84
4.3.2. Modele practice de activare	85
4.3.3. Studiul comparativ al brevetelor de invenție pentru matrițe de injectare activate ultrasonic	87
LIMITELE CERCETĂRII	90
4.3.4. Programul de cercetare și dezvoltare ULTRA-MELT	91

LIMITELE CERCETĂRII	92
4.4. EXPERIMENTUL FACTORIAL	93
4.4.1. Experimentul factorial 2^k	95
4.4.2. Parametrii de studiu pentru experimentul factorial	98
4.5. EXPERIMENTE PRELIMINARE SI STABILIREA MATERIALULUI FOLOSIT	101
4.6. STABILIREA LIMITELOR DE VARIAȚIE A INTERȘTIȚIULUI DE CURGERE.....	104
4.7. PLANIFICAREA EXPERIMENTULUI FACTORIAL	107
4.7.1. Planificarea experimentului factorial la injectarea fără activarea duzei	107
4.7.2. Planificarea experimentului factorial la injectarea cu activarea duzei.....	108
4.7.3. Planificarea experimentului factorial la injectarea fără activarea poansonului- cuibului	108
4.7.4. Planificarea experimentului factorial cu activarea poansonului-cuibului.....	109
4.8. CONCLUZII ȘI RECOMANDARI PRIVIND PROIECTAREA MATRIȚEI CU ACTIVARE	
ULTRASONICA	110
CAPITOLUL 5	117
VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A MODELELOR TEORETICE	117
5.1. SIMULAREA CURGERII IN MATRITA.....	117
5.1.1. Studiu de caz	118
5.2. REZULTATE EXPERIMENTALE OBȚINUTE.....	125
5.2.1. Rezultate experimentale la injectarea fără activarea duzei	127
5.2.2. Rezultate experimentale la injectarea cu activarea duzei.....	128
5.2.3. Rezultate experimentale la injectarea fără activarea poansonului-cuibului...	129
5.2.4. Rezultate experimentale cu activarea ultrasonică poansonului-cuibului	129
5.3. ANALIZA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE.....	131
5.3.1. Injectarea fără activarea duzei.....	131
5.3.2. Injectarea cu activarea duzei	136
5.3.3. Injectarea fără activarea poansonului-cuibului	143
5.3.4. Injectarea cu activarea poansonului-cuibului.....	148
5.4. INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE ȘI CONCLUZII	156
CAPITOLUL 6	158

CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	158
6.1. CONCLUZII.....	158
6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE.....	161
6.3. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	162
BIBLOGRAFIE.....	163
ANEXE.....	171

Abrevieri

Termen	Definiție
ABS	Acrilonitril-butadien-stiren
ANOVA	Analiza dispersională numită și analiza varianței
CAE	Proiectare asistată de calculator (Computer Aided Engineering)
C-MOLD	Program dezvoltat de AC Tehnologies este folosit ca instrument de calcul numeric
LIGA	Tehnologie care permite obținerea de piese injectate de ordinul micronilor
PA	Poliamida
PBT	Polibutilentereftalat
PC	Policarbonat
POM	Poliacetal
PMMA	Polimetacrilat de metil
PPO/PPE	Polifenilenoxid
PPS	Polifenilensulfura
PEI	Polieterimid
PES și PSU	Polietersulfona și Polisulfona
PEEK	Polieterestercetona
PPA	Polyphthalamide
μIM	Microinjectare

Capitolul 1

Introducere

Materialele plastice reprezintă un domeniu dezvoltat relativ recent în raport cu materialele ceramice sau metalice. Cunoscute sub denumirea de materiale polimerice, ele au fost implementate industrial în anii 1930-1950.

Materialele plastice compozite sunt obținute pe bază de polimeri (organici sau substanțe macromoleculare). Polimerii organici pot fi naturali, artificiali sau sintetici. Polimerii sintetici sunt cei mai des utilizați în industrie deoarece au o gamă mare de proprietăți fizice.

Stadiul actual al pieței materialelor plastice l-a depășit pe cel al oțelurilor și aluminiului. Spre exemplu, în anul 2002, industria a folosit 2.851.000 tone de materiale plastice iar cerințele acestui domeniu sunt o recunoaștere a ingineriei de înaltă performanță. Cererile de materie primă au fost în creștere, cu 7-8% pe an, între 1997 și 2000. În anul 2005 producția SUA de materiale polimerice a depășit suma de 40 miliarde de dolari la materia brută și 90 de miliarde la produse finite. Cu materiale și procese tehnologice în continuă dezvoltare, este de așteptat ca industria de mase plastice să mențină o creștere istorică în sectorul de producție. Materialele polimerice reprezintă acum o medie de aproximativ 9,5% din greutatea totală a autoturismelor. Polimerii și ingineria de înaltă performanță a materialelor plastice sunt folosite pentru fabricarea de aplicații solicitante în industrie.

Evaluate din punct de vedere al proprietăților, materiale plastice de cele mai multe ori sunt folosite pentru aplicații ale ingineriei auto datorită faptului că sunt mai rezistente la temperaturi ridicate, prezintă stabilitate dimensională și rezistență la o gamă diversă de produse chimice. Aceste proprietăți au dus la înlocuirea materialelor tradiționale, cum ar fi metalul, cu materialele polimerice în industria mondială. Policarbonații acrilici au fost de asemenea cei care au luat locul sticlei la aplicații precum capacele lentilelor farurilor și componentele din sticlă ale monitoarelor.

De asemenea materialele plastice oferă o flexibilitate mai mare de proiectare, reduc timpul de dezvoltare și reduc costurile de asamblare și de producție. În Europa, utilizarea de materiale plastice în industrie a crescut cu 115% între anii 1990 și 2000.

Tendențele viitoare în utilizarea de materiale polimerice pentru aplicațiile industriale vor fi influențate de o serie de factori importanți. Costurile de producție și scăderea în greutate vor rămâne un stimulent important pentru producătorii de autovehicule, care vor favoriza înlocuirea metalului cu materialele plastice.

1.2. Noțiuni generale despre principalele materiale polimerice utilizate în industria auto

1.2.1. Poliamida – PA [ELI03]

Poliamida este un material plastic obținut prin policondensarea unor (amino) acizi sau prin polimerizare și este folosit, mai ales, la producerea fibrelor sintetice. Ea are un succes real și poate înlocui piese metalice la diferite componente și ansambluri industriale. Principalele motive pentru succesul poliamidei în industrie este că ea prezintă o greutate mai mică, costuri mai mici și funcționalitate mai bună în comparație cu alte materiale. În anul 2002, consumul total de poliamidă în industrie a fost de 660 mii tone, față de 638 mii tone în 1999. Industria automobilelor folosește o cantitate de 34% din volumul total de poliamidă de pe piața mondială după un sondaj realizat în decursul anului 2002.

Poliamida este folosită în toate zonele importante ale automobilelor. Majoritatea componentelor de sub capota automobilului sunt produse din poliamidă, urmat de sistemul de iluminat din exterior și interior dar și diverse componentele electrice. Poliamida este utilizată în obținerea diverselor carcase dar și la alte produse cum ar fi: sisteme de răcire, componente ale circuitului apei, componente de admisie, piese ale accelerației și componente ale motorului. Poliamida este un material de înaltă performanță și este, de asemenea, utilizat pentru a produce tubulatura din diverse aplicații, cum ar fi furtunurile de răcire și alimentare cu combustibil a mașinii.

Furnizorii de materiale continuă să dezvolte și să îmbunătățească proprietățile de rezistență la hidroliză, care îi permite materialului să reziste la contact continuu cu apă fierbinte și glicoli. Poliamida joacă un rol major în toate produsele electronice și echipamentele electrice utilizate în automobile. Se găsește și în zonele periferice ale mașinii, la senzori, comutatoare, relee și alte componente electronice.

Datorită proprietăților de rezistență la tensiuni electrice, temperaturi ridicate și la acțiune substanțelor chimice, poliamida este un material care poate fi folosit pentru a produce diverse componente electrotehnice.

1.2.2. Acrilonitril-butadien-stiren - ABS [MUC92]

ABS rezultă din copolimerizarea a trei monomeri: acrilonitril, butadiena și stiren. Variația proporțiilor din fiecare monomer conduce la obținerea unor tipuri de ABS cu diferite proprietăți.

Proprietățile mecanice ale ABS-ului sunt reprezentate printr-o tenacitate ridicată, o bună rigiditate și o mare duritate a suprafeței.

Principalele aplicații ale ABS-ului sunt tablourile de bord, mânerul portierelor, ușile de interior, capacele de cutii de la torpedo și consolele. Amestecurile de PC / ABS sunt de asemenea folosite în multe dintre aceste aplicații, în principal în zonele din autoturism având o suprafață mai întinsă (planșe bord). Piesele exterioare reprezintă doar un sfert din volumul total al ABS-ului utilizat pe piața automobilelor.

ABS-ul poate fi găsit, de obicei în combinație cu policarbonați (PC) ca un amestec, în sistemele electrice. Materialul este foarte rar găsit în componente ale motorului mașinii din cauză că prezintă o mai mică rezistență la temperaturi ridicate în comparație cu alte materiale polimerice. ABS-ul este, de asemenea, utilizat în asociere cu policarbonatul, pentru o serie de componente electrice și electronice. Combinația PC / ABS este considerată având perspective bune de dezvoltare la aplicații din interiorul automobilului în special la sistemele de navigație.

ABS-ul este materialul preferat pentru IT dar și pentru carcase PC, echipamente de telecomunicații etc. ABS-ul este un material ce prezintă bune proprietăți de rezistență, este dur și rigid. ABS-ul prezintă de asemenea o bună rezistență la agenții chimici iar calitatea suprafeței piesei rezultate este excelentă. ABS-ul este ușor de prelucrat și are excelente proprietăți antistatice. ABS-ul împreună cu amestecurile de PC / ABS sunt utilizate în carcase pentru diferite produse din alte ramuri ingineresti de la piese pentru calculatoare personale, foto-copiatoare și faxuri până la telefonie mobilă.

1.2.3. Polibutilentereftalat – PBT [MUC92]

PBT a înlocuit metalul în componentele electrice pentru industria auto deoarece este un material rigid și rezistent. Una din cele mai importante proprietăți ale PBT-ului este că prezintă o rezistență foarte bună la uzură, căldură, la carburanți și lubrifianți.

Dacă sunt armate cu fibre de sticlă produsele făcute din granule de PBT au dus la scăderea numărului de produse deformat. În plus, PBT-ul are excelente proprietăți electrice și termice pe termen lung.

Un avantaj suplimentar este inflamabilitatea scăzută la produsele din PBT prin încetinirea flăcării. Produsele obținute la automobile sunt capace de motor, carcase de la cutiile de viteze, recipiente de combustibil și relee, senzori, conectori, bobine și supape de frânare.

Alte utilizări pentru PBT includ: ștergătoarele de parbriz, carcasele oglinzilor și mânerele ușilor. PBT-ul mai este utilizat în produsele cu rezistență mare la factorii de mediu. Aplicațiile specifice pentru PBT includ piese pentru carburatorul automobilelor.

1.2.4. Policarbonat - PC [McC89]

Policarbonatul este folosit în principal pentru fabricarea lentilelor. Lentilele de sticlă a farurilor auto au fost practic înlocuite cu plastic transparent. Plasticul poate rezista la temperaturi foarte ridicate, iar acesta poate fi modelat în aproape orice formă. Versatilitatea PC-ului oferă, de asemenea, inginerilor o mai mare libertate de proiectare și de utilizare la farurile mașinii. Principalele aplicații pentru policarbonat în interiorul mașinii sunt lentile pentru afișarea panoului de instrumente și luminile de pe plafon. Produsele tipice pentru amestecul de PC / ABS trebuie să prezinte bune proprietăți de rezistență la impact, stabilitate dimensională și rezistența la căldură, care sunt obligatorii mai ales în cazul produselor din tablourile de bord. PC / ABS este de asemenea folosit în alte aplicații cum ar fi: mânerele ușilor și sisteme de navigare.

PC-ul este, de asemenea, utilizat la o gamă largă de suprafețe și finisaje vizibile, cum ar fi: diferite tipuri de piese de pe panoul frontal deoarece asigură o înaltă calitate a produselor disponibile. Policarbonatul este de asemenea folosit în obținerea echipamentelor de telecomunicații, de obicei sub forma unui amestec cu PBT. Se utilizează pentru tastaturile de la calculatoare și discurile magnetice. PC-ul și amestecurile PC / PBT sunt de asemenea folosite pentru piese din telefonie mobilă. PC-ul este evaluat ca fiind un material cu o mare rezistență la impact, rezistență la temperaturi ridicate iar calitatea suprafeței produselor este foarte bună.

1.2.5. Poliacetal – POM [McC89]

Unele dintre principalele aplicații ale POM-ului se găsește în sistemele electrice de montare, trenuri de viteze, switch-uri cu funcție de semnalizare, comutatoare, sisteme de reglare a scaunelor, sisteme de control climatic și sistemele de blocare a ușilor.

Poliacetalii sunt apreciați în aplicațiile auto pentru rezistența la temperaturi ridicate dar și pentru rezistența la agenții chimici. Produsele din POM prezintă o mare stabilitate dimensională și o bună rezistență la uzură și la frecare.

Produsele specifice din acetal sunt: mânerele ușilor, mecanismele de blocare, diverse piese pentru sistemele de securitate, elementele de fixare a geamurilor, sistemele manuale și butoanele de reglare a scaunului. Aplicațiile folosite la motorul autoturismului din POM sunt: furtunuri pentru livrarea combustibilului și a sistemelor de frânare. Ele sunt folosite pentru

rezistența lor la combustibil, stabilitate dimensională, rezistență la oboseală și rezistența la fluaj. Principalele produse din POM din exteriorul automobilului sunt ștergătoarele de parbriz și mânerul ușilor. În electronică, POM-ul este folosit pentru tastaturile de telefon, bobine, întrerupătoare, casete video, Cd-playere și camerele video.

Poliacetalul este evaluat ca fiind un material care prezintă duritate și rigiditate mare, o foarte bună rezistență la căldură și la deformare el fiind de asemenea un material cu bune proprietăți electrice și dielectrice.

1.2.6. Polimetacrilat de metil – PMMA [BAR71]

În sistemele de iluminat electric, PMMA-ul este utilizat pentru a produce o gamă de lentile comerciale și industriale. Materialul este apreciat pentru proprietățile sale optice, și rezistența la agenții chimici dar și pentru proprietățile bune privind duritatea și durabilitatea.

1.2.7. Polifenilenoxid - PPO, PPE [NAG93]

Materialul prezintă rezistență la temperaturi ridicate și astfel permite injectarea pieselor cu pereți subțiri. Produsele din acest material au greutate mai mică comparativ cu alte materiale. Amestecurile de PPO au alungire mare, greutatea specifică redusă și rezistență bună la căldură pe termen lung.

Amestecurile de PPO / PPE sunt folosite într-o gamă largă de aplicații solicitante ale automobilelor ca înlocuitor pentru metal. Principalele aplicații sunt barele de protecție. Amestecurile de PPO / PPE mai sunt folosite în echipamentele electrice și în echipamentele de telecomunicații cum ar fi: carcase, dispozitive de rețea, circuite de cablu și extensii de sârmă. Principalele proprietăți sunt: bună rezistență chimică (remarcabilă la solvenți, acizi și baze) combustibili și alți contaminanți, prelucrabilitate excelentă, rezistență la impact, rezistență la temperaturi extreme și o foarte bună prelucrare a pieselor cu pereți subțiri. PPO în amestec cu PPE este de asemenea folosit pentru fabricarea diferitelor carcase de baterii. Aceste amestecuri ale celor două materiale prezintă rezistență bună la tracțiune.

Principalele avantaje ale materialului sunt rezistență la agenții chimici și rezistență la impact dar și rezistență la vibrații și la umezire.

1.2.8. Polifenilensulfura – PPS [EHR95]

PPS-ul este un material ce prezintă o contracție scăzută. Este folosit pentru fabricarea unor serii diverse de produse, inclusiv conectori, hard disk-uri, carcase electronice, prize, întrerupătoare și releu.

PPS este o alegere ideală pentru piese auto expuse la temperaturi ridicate, fluide din automobile sau stresului mecanic. PPS-ul este o alternativă a pieselor cu o greutate mai mică decât ale pieselor din alte materiale. PPS-ul este rareori folosit pentru fabricarea de piese electrice. Materialul PPS este utilizat în următoarele aplicații auto: sistemele de inducție, senzori de debit de carburant, pompa de combustibil, sisteme de răcire, tuburi de extensie, rezervoare de bază sau de încălzire, carcase termostat, componente de supape, orificiile de admisie de apă și pompa de apă.

1.2.9. Polieterimid - PEI [MUC92]

PEI-ul este utilizat în aplicații care necesită o mare rezistență la căldură. Este un material de înaltă rezistență chimică și este utilizat pe o scară largă în industria auto.

Acest material este rezistent la foc, cu emisie redusă de fum, ceea ce face PEI potrivit pentru o varietate de aplicații în domeniul echipamentelor electrice și electronice. Pe piața telecomunicațiilor există o nevoie tot mai mare de materiale rezistente la căldură. PEI oferă rezistență la temperaturi ridicate, precum și posibilitatea prelucrării pieselor cu pereți subțiri. Alte aplicații includ comutatoare electrice și de control, piese electrice, circuite imprimate și conectori.

Principalele aplicații pentru PEI includ: componentele de calculator, de telecomunicații și telefoanelor mobile, antenele interne sau microfiltre, fibră optică, conectori, componente de transport, de accelerație, componente de aprindere, carcase termostat, rame de la geamuri, reflectoare, prize, sisteme electromecanice, siguranțe, roți dințate, rulmenți, switch-uri dar și componente de la pompa de ulei. PEI-ul este, de asemenea, utilizat pe scară largă în aplicații de iluminat auto, cum ar fi faruri reflectorizante sau reflectoare a luminilor de ceață, rame și prize pentru becuri. PEI mai este utilizat pe scară largă în industria aeronautică iar aplicațiile principale sunt supapele aer și de combustibil, recipiente de alimentare, placarea părților interioare a componentelor semi-structurale. Materialul are, de asemenea, rezistență chimică excelentă la combustibilii și lichidele folosite în industria aeronautică.

1.2.10. Polietersulfona și Polisulfona - PES și PSU

Sunt materiale termoplastice amorfe rezistente la temperaturi foarte ridicate. PES și PSU pot înlocui, de asemenea, metalele sau ceramica.

Principalele motive pentru care PSE / PSU pot fi folosite în aplicații industriale sunt că prezintă o rigiditate mare, rezistență la temperaturi de funcționare ridicate permanent, rezistență mecanică foarte bună, bune proprietăți de izolare electrică, rezistență la lubrifianți și

o bună stabilitate dimensională. În industria auto, principalele aplicații pentru PSU și PSE sunt: plafoane, pompe de ulei, pistoanele de comandă de ulei, piese de transmisie, piese de carburator și componente de aprindere. PES și PSU sunt, de asemenea, găsite în farurile mașinii dacă PES-ul este armat cu fibră de sticlă [SID75].

PES armat cu fibră de sticlă asigură o circulație a uleiului deosebit de bună, deoarece polimerul asigură stabilitatea termică și dimensională necesară atunci când este în contact cu uleiul de motor cald. În plus, materialul are proprietăți mecanice și tribologice remarcabile de rezistență la temperaturi ridicate. PSE / PSU sunt de asemenea folosite pentru producerea componentelor din interiorul și exteriorul aeronavelor [SHA78].

PES și PSU au proprietăți termice remarcabile, fluaj redus, chiar și la temperaturi ridicate, proprietăți izolante excelente și dielectrice de înaltă rezistență. Alte aplicații ale folosirii acestor materiale în industria electronică sunt diverse componente, cum ar fi bobinele, socket-urile de la conectori, piese pentru întreruptoare de putere mare și relee.

Materialul este folosit pentru a acoperii transparența lămpilor de semnalizare, având rol de strat protector, dar și la producerea de senzori, rețele de procesoare, componente TV, piese de uscător de păr, la cuptoare, la ventilatoare și diverse componente ale proiectoarelor.

1.2.11. Polieterestercetona - PEEK [WHI75]

Tendința de miniaturizare în industria auto a dus la înlocuirea metalelor cu materialele plastice, lucru ce a dus la scăderea în greutate, reducerea zgomotului funcționare și la temperaturi de operare mai ridicate ceea ce oferă, de asemenea integritatea funcțională a motorului din cadrul automobilului.

PEEK este unul dintre acei polimeri de înaltă performanță care pot fi folosiți în aplicații foarte dificile ca o alternativă de înlocuire a metalului. Acest material prezintă remarcabile proprietăți mecanice, ușurință de prelucrare în vederea obținerii de piese, proprietăți excelente de rezistență la oboseală.

Produsele cheie din automobile realizate din acest material se găsesc în pistoane, garnituri, șaibe, rulmenți și în diverse componente active utilizate în aplicații cum ar fi transmisia, sistemul de frânare și de aer condiționat. Pe piața aerospațială, polimerii PEEK sunt cei care pot înlocui alumiul și alte metale într-o gamă largă de aplicații.

Polimerul prezintă remarcabile proprietăți fizice, termice dar și alte proprietăți cum ar fi greutatea redusă și ușurință de prelucrare. Cererile pentru PEEK în industria aerospațială sunt mari deoarece el este folosit în părțile critice ale motorului pentru că polimerul poate rezista la temperaturi ridicate și are bune proprietăți de lubrifiere. În părțile exterioare ale

aeronevelor, PEEK-ul este folosit deoarece oferă o excelentă rezistență la ploaie și coroziune, în timp ce pentru componentele din interiorul aeronevelor este folosit pentru că în caz de pericol de incendiu flacăra și fumul sunt scăzute deci prezintă proprietăți și pentru reducerea emisiilor de gaze toxice. În sistemele electrice din aeronave polimerul este utilizat pentru fabricarea de țevi spiralate pentru a proteja firele și filamente de fibră optică [YU90].

Polimerul PEEK are proprietăți electrice excelente, ceea ce face să fie utilizat în sistemele electrice ca un bun izolator. PEEK-ul mai prezintă proprietăți de fiabilitate de-a lungul timpului și rezistență la diverse temperaturi, presiuni și frecvențe ridicate, ceea ce determină folosirea lui pe o scară largă de exploatare [GAN99].

Toate aceste proprietăți împreună cu puritatea materialului și cu proprietățile mecanice și chimice oferă o mai mare stabilitate și siguranță de-a lungul timpului. PEEK este folosit pentru că rezistă la temperaturi ridicate asociate cu procesele de sudură. Câteva exemple de aplicații interesante actuale includ conectori coaxiali, locașe utilizate în kiturile de telefon "mâini libere", anumite dispozitive electro-mecanice cunoscute sub numele de SMD, destinate să corecteze erorile de tensiune sau de rezistență la circuitele imprimare, dar și ca izolatoare pentru diverși conectori de la echipamentele de control în conformitate cu cerințele de mediu [CHE01].

1.2.12. Polyphthalamide - PPA

Performanțele termice ale acestui material sunt depășite doar de materialul PEEK. PPA-ul este folosit pentru multe tipuri de componente din industrie auto, inclusiv senzori, prize de lămpi cu halogen și de ceață, a închiderilor de la capetele motorului și carcase, componente ale sistemului de combustibil (flanșe, șine de combustibil, conectorii liniei de combustibil), componentele de anti-blocare a sistemului de frânare, componentele sistemului de răcire și încălzire (carcase pentru termostat, carcase pentru filtrele de ulei) [XU05].

PPA este, de asemenea, utilizat într-o gamă variată de aplicații la temperaturi ridicate în sectorul de electronice, cum ar fi: prize de lămpi, conectori, switch-uri rezistente la temperatură înaltă și senzori. Materialul PPA prezintă proprietăți de înaltă rezistență la deformare la temperaturi de peste 282 °C, rigiditate și rezistență la impact mare. PPA-ul este, de asemenea, stabil dimensional și rezistă la coroziune [YU02].

Cererile principale pentru PPA pe piețele de electronice includ LED-uri cu bune proprietăți optoelectronice precum și alte dispozitive cum ar fi: componentele electronice, condensatorii și tranzistorii, cip-urile și comutatoarele de căldură. Tendința în domeniul electronicii spre miniaturizare a determinat necesitatea de a insera conectorii în contacte, iar

acest lucru necesită toleranțe mai stricte și mai precise, fapt ce a determinat utilizarea rășinilor de flux pentru pereții subțiri. Materialul PPA poate fi utilizat și în straturile circuitelor imprimate PCB [HEY01].

1.3. Injectarea materialelor plastice polimerice

1.3.1. Principiul injectării materialelor plastice

Procedeul de injectare presupune introducerea materialului plastifiat sub presiune într-o matriță unde, după răcire, ia forma cavității. Piesele injectate sunt eliminate din matrița cu ajutorul unui sistem de aruncare, urmând un nou ciclu de injectare [McC89].

Importanța procesului de injectare a materialelor plastice este dată și de posibilitatea de a obține repere cu forme complicate și dimensiuni diferite, fără a mai fi necesară o prelucrare ulterioară. Răspândirea reperelor injectate este vastă, acestea regăsindu-se în toate domeniile de activitate, de la bunuri de larg consum, articole tehnice, jucării, ambalaje etc, până la repere utilizate în industria aeronautică și aerospațială. Greutatea produselor variază de la sub un gram, în cazul microinjectiei, până la aproximativ 20kg [SMU91],[KAZ06].

Majoritatea proceselor de injectare se pot clasifica în (figura 1.1):

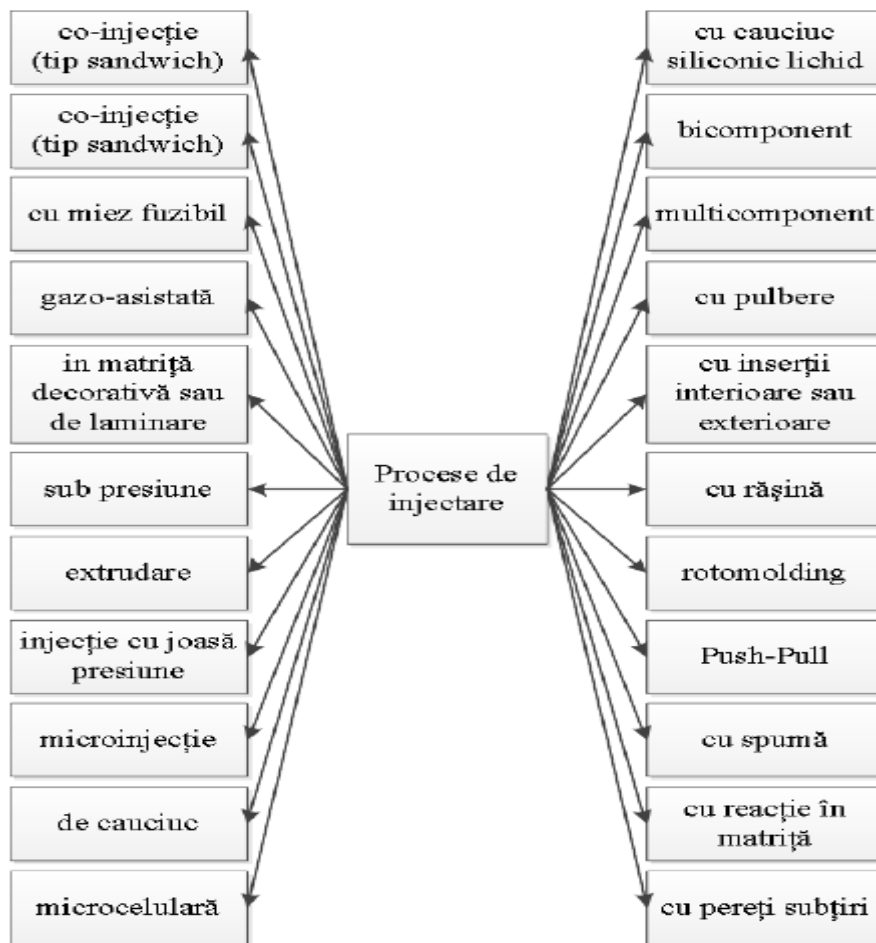


Fig. 1.1 Clasificarea proceselor de injecție [FEL77]

1.3.2. Procesul matrițării prin injecție

Matrițarea prin injecție reprezintă procedeul cel mai des întâlnit în industrie pentru obținerea pieselor din material plastic. Acest procedeu are la bază încălzirea materialului plastic până la atingerea stării de lichid și forțarea curgerii acestuia prin orificii înguste, în cavitatea unei matrițe unde are loc răcirea și solidificarea lui. La sfârșitul ciclului matricea se deschide și se extrage piesa fasonată la forme și dimensiuni precise. În figura 1.2 se prezintă o mașină de injecție [LOR75].



Fig. 1.2 Mașina de injectat Krauss Maffei [www.kraussmaffei.com]

Principiului matrișării prin injectare este redat schematic în figura 1.3 care presupune umplerea cavității matriței cu material plastic topit printr-un cilindru de injectare care menține presiunea în timpul injectării și a solidificării în matriță [SAN83].

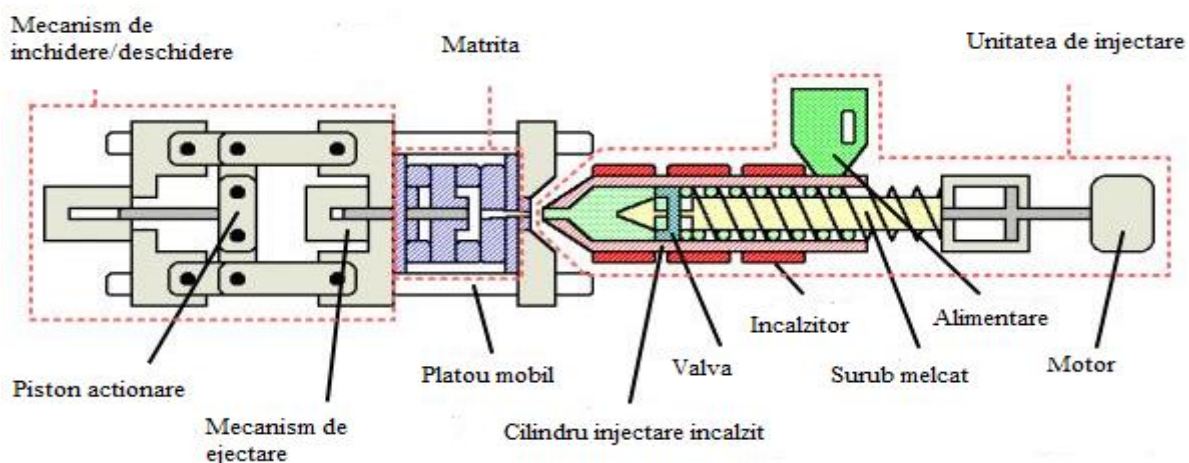


Fig. 1.3 Schemă simplificată a mașinii de injectat [www.wikipedia.org]

1.3.3. Factori care influențează procesul de injecție

Analiza proceselor de injectare evidențiază mecanisme generatoare de instabilitate dimensională și geometrică în fiecare fază a unui ciclu de producție. Cunoașterea acestora este esențială încă din faza de concepție a produsului pentru a asigura controlul cât mai riguros al procesului de producție [KAZ93].

Procesul de injectare se poate prezenta ca un sistem alcătuit din mașină și matriță de injectat, sistem de tip informatic. Sistemul se caracterizează prin mărimi de intrare, mărimi de

ieșire, parametri și mărimi perturbatoare. Prin analiza sistematică a dependențelor dintre mărimile de intrare și mărimile de ieșire este posibilă optimizarea procesului (figura 1.4) [SMU91].

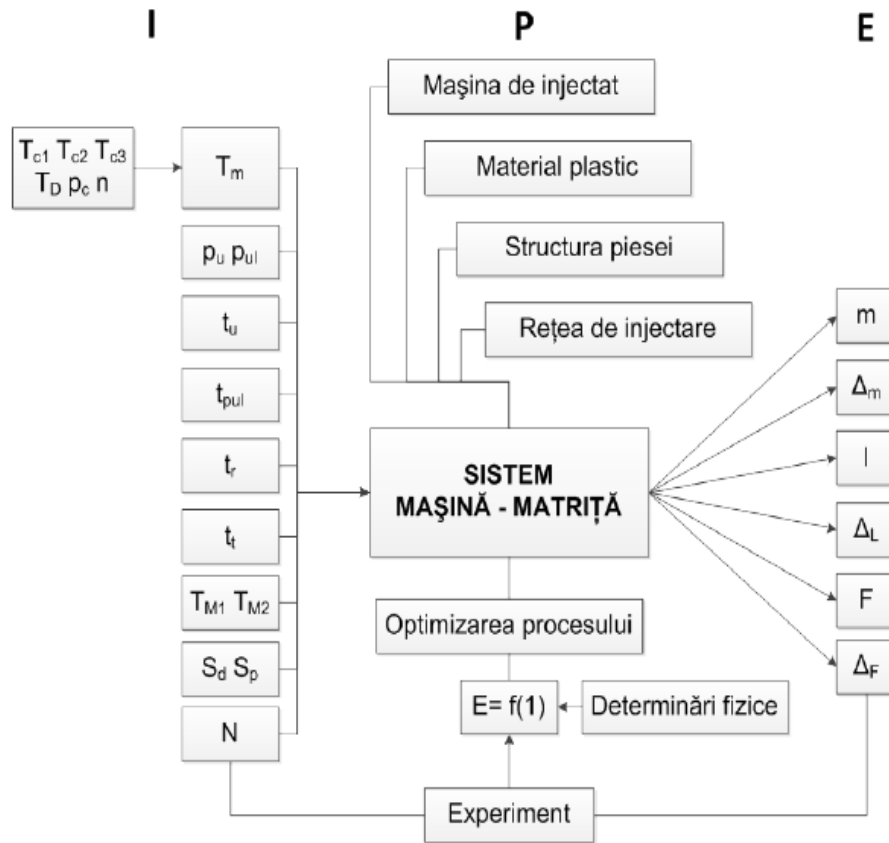


Fig. 1.4 Sistemul matriță – mașină de injectat [KAZ93],[SMU91]

unde: I - mărimi de intrare ($T_{c1} \dots T_{c3}$ - temperaturile cilindrului de injectare; T_D - temperatura duzei; p_c - contrapresiunea la dozare; n - rotația melcului; T_m - temperatura materialului; p_u - presiunea de umplere; p_{ul} - presiunea ulterioară; t_u - timpul de umplere; t_{pui} - timpul presiunii ulterioare; t_r - timpul de răcire; t_t - timpul total; T_{M1} , T_{M2} - temperaturile matriței, S_p - perna de material; N - forța de închidere a matriței); P - parametri; E - mărimi de ieșire (m - masa piesei injectate; Δ_m - dispersia masei piesei; l - dimensiunea; Δ_l - dispersia dimensională; F - abaterea de formă; Δ_F - dispersia abaterii de formă).

1.4. Sinteză a principalelor defecte care apar la piesele polimerice produse prin injectare

1.4.1. Piesă cu goluri de aer [OKE93]

Acest defect apare atunci când fronturile de curgere înconjoară un volum de aer în cavitatea matriței („aer captiv”). Frontul de curgere umple secțiunile mai groase apoi înaintează pentru a umple secțiunile mai subțiri ale piesei. Aerul captiv în cuibul matriței împiedică umplerea completă și va determina adesea o cavitate mică în volumul produsului sau chiar o urmă de arsură pe suprafața piesei.

Acest defect are loc atunci când fluxurile de material plastic topit în regiunile mai groase unde curge mai ușor decât regiunile cu pereți mai subțiri (figura 1.5).

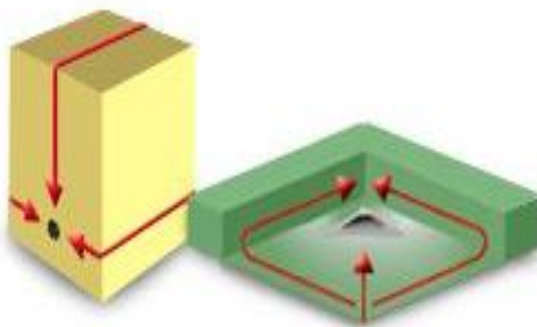


Fig. 1.5 Goluri de aer[WHI06]

Într-o piesă cu zone diferite de grosime, topitura poate încetini sau chiar se poate opri în regiunile subțiri. Într-o parte cu grosime neuniformă, fluxul de curgere poate varia și din nou pot să apară goluri de aer.

Lipsa de deschideri sau de orificii de aerisire în ultimele zone de umplere a piesei sunt cauză principală a apariției de golurilor de aer. Schimbarea sistemului de ventilare poate modifica matrița în așa fel încât umplerea să se efectueze corespunzător.

Rezolvarea unui defect în mod repetat poate introduce alte probleme la procesul de injecție. Fiecare opțiune necesită, prin urmare, luarea în considerare a tuturor aspectelor relevante ale specificației de proiectare a formei piesei.

În concluzie principalele cauze de apariție a acestor defecte sunt: presiunea de menținere insuficientă poziția punctului de injectare sau proiectarea necorespunzătoare a piesei. Este posibil ca operatorul de pe mașină să provoace golurile de aer prin deschiderea

ușii de evacuare a piesei prea repede. Vechimea, uzura sau tipul mașinii, pot determina apariția acestui defect.

Deși poate avea impact asupra costului de producție, se dorește reducerea la minim a golurilor de aer. Reducerea temperaturii de injectare poate ajuta la evitarea apariției acestor defecte, dar această practică poate determina deformarea din cauza cerințelor de creșterea a presiunii de injectare.

Dacă este posibil, trecerea mașinii pe ciclu automat, folosind operatorul doar pentru a întrerupe ciclul în cazul în care apare o situație de urgență. Folosirea unui robot în cazul în care un operator nu este necesar.

Remedii pentru reducerea apariției defectului:

- Creșterea presiunii de menținere;
- Creșterea timpului de menținere;
- Verificarea reglajului de dozare a materialului (cilindrul mașinii);
- Verificarea și dacă e cazul mărirea diametrului duzei de intrare în matriță;
- și/sau a canalelor de distribuție;
- Alegerea punctului de injectare în zone cu grosimi mari de perete.

1.4.2. Probleme de fragilitate și degradare a materialului [ZHA03]

O parte din piesă este mai fragilă și are tendința de a se fisura sau rupe. Cauzele fragilității pot determina o lungime mai mică a lanțului molecular (greutate moleculară mai mică). Ca urmare, integritatea fizică pe de o parte este mult mai mică decât în specificațiile tehnice a piesei. În figura 1.6 se prezintă o piesa degradată.

Degradarea materialului poate fi cauzat de viteza excesivă de injectare, timpul de staționare sau de temperatura de topire. Alegerea și proiectarea incorectă a canalelor de distribuție poate duce, de asemenea, la degradarea materialului.

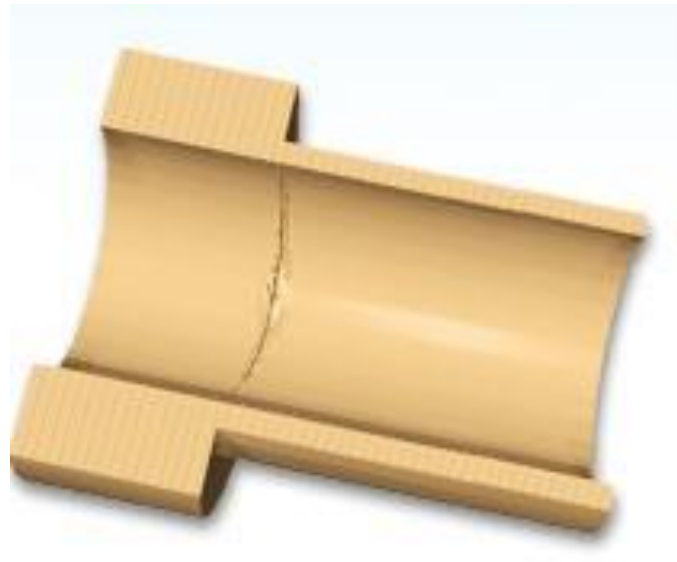


Fig. 1.6 Urme de degradare a piesei [ZHA03]

Cauzele apariției acestui defect pot fi :

- liniile de sudură;
- cristalinitatea necorespunzătoare;
- presiune mare;
- incompatibilitatea materialelor;
- măcinare prea mare a materialului;
- uscare în condiții improprii. Uscarea excesivă acționează asupra materialului plastic, făcându-l mai sensibil la prelucrare, sau determinând degradarea acestuia;

Remediile privind reducerea degradării:

Pentru a prevenii apariția degradării, se acorda o atenție importantă asupra procedului de uscare a pieselor. Alte remedii mai pot fii:

- optimizarea designului canalelor de distribuție. Se vor redimensiona culeea, canalele de distribuție, digurile astfel încât încălzirea excesivă a marginilor să nu poată determina degradarea materialului;
- alegerea unei mașini de injectare cu o cantitate de material mai mică;
- minimizarea timpului de staționare care poate reduce degradarea materialului;
- reducerea tensiunilor remanente;
- modificarea liniilor de sudură.

1.4.3. Piesă arsă

Arsurile sunt mici și au un aspect de culoare sau pată neagră pe suprafața piesei. Acest defect este asemănat cu dungii întunecate sau pete de culoare închisă pe piesă. Apar sub forma unor zone brune sau înnegrite (posibil chiar aspect de material carbonizat) la extremitățile drumului de curgere al materialului topituri (în partea opusă punctului de injectare), la nivelul nervurilor, bosajelor și a colțurilor închise [SHA78].

Cauzele pieselor arse este aerul captiv în material care se poate comprima, iar căldura excesivă poate provoca arsuri pe suprafața piesei. Acest lucru poate fi cauzat de o viteză excesivă de injectare, timpul de solidificare sau temperatura de topire [HOL97].

Proiectarea improprie a canalelor de distribuție poate duce de asemenea la degradarea materialului. În zonele cu aerisire deficitară din interiorul matriței, aerul captiv este puternic comprimat astfel încât prin efect Diesel se produce creșterea locală a temperaturii [HOL97].

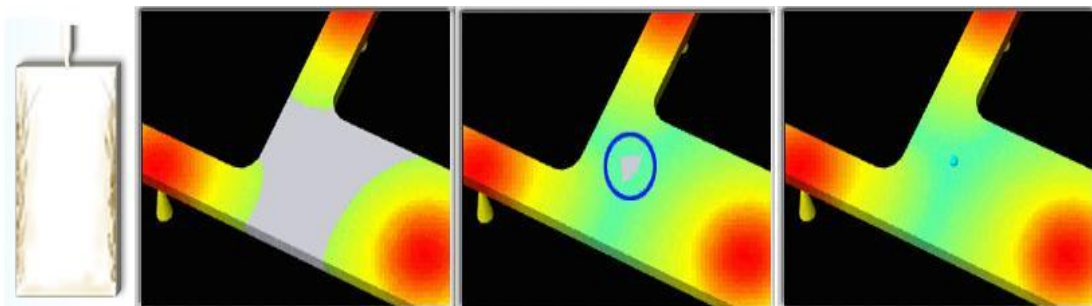


Fig. 1.7 Arsură pe piesa injectată [HOL97]

Arderea materialului este rezultatul depășirii pragului maxim al intervalului de temperaturi indicat pentru procesare (degradare termică). În figura 1.7 se poate observa modul în care se formează o astfel de degradare termică.

Remedii privind reducerea efectului de piesa arsă:

- Optimizarea aerisirii matriței mai ales la zonele de confluență dintre materialul plastic injectat și extremitățile drumului de curgere;
- Modificarea traseului de curgere prin modificarea grosimilor de pereți, re poziționare (sau chiar suplimentarea) a punctelor de injectare, redimensionarea digurilor;
- Verificarea aerisirilor matriței;
- Reducerea forței de închidere;
- Evacuarea forțată a aerului din matriță;

- Eliminarea capcanelor de aer.

1.4.4. Fisurarea/Crăparea

Acest defect poate determina o viață scurtă a piesei, rezultând un produs inacceptabil pentru client. Fisurile din piesă nu se evidențiază decât după un interval de timp de câteva zile sau o săptămână după producție. Prin urmare, este mai bine să se determine și să se elimine problema potențială de fisurare înainte de pornirea producției de serie sau masă. Programul Moldflow oferă o analiză a umplerii piesei în condițiile optime de injectare [KEN95].

În figura 1.8 se evidențiază la jumătatea piesei o fisură considerabilă.

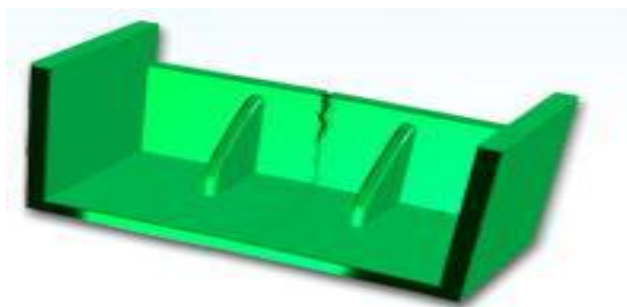


Fig. 1.8. Fisurarea [KEN95]

Cauzele apariției fisurării sunt:

- tensiunile remanente mari. Pot să apară fisuri în regiunile în care tensiunile interne sunt în marginea piesei;
- liniile de sudură proiectate greșit. Atunci când fluxurile de curgere se întâlnesc în timpul procesului de umplere, vor apărea probleme structurale vizibile și vor fi inacceptabile;
- Con tracție diferențiată. Liniile de curgere orientate diferit, contracție diferită, tensiunile interne diferite pot fi alte cauze ale acestui defect.

Remedii pentru a evita apariția fisurilor:

- Trebuie să se mărească viteza de injectare atunci când piesa are pereții groși;
- Verificarea presiunii de injectare ca să nu depășească valoarea maximă recomandată pentru materialul injectat.

1.4.5. Delaminare sau exfoliere

În literatura de specialitate sunt menționate și sub termenii de delaminare sau straturi care se desprind de pe piesă ca fiind defecte în care pe suprafața piesei injectate se observă o porțiune care poate fi desprinsă strat cu strat.

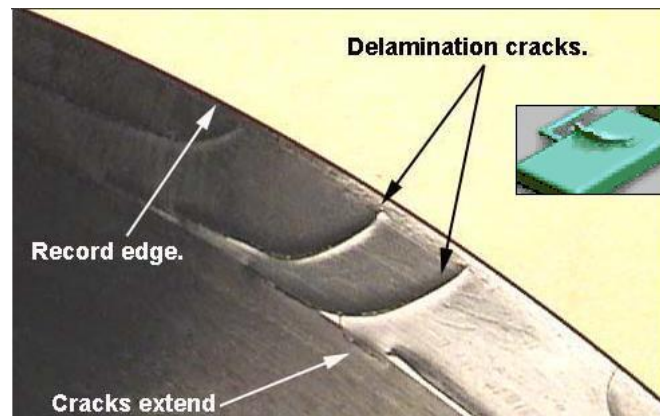


Fig. 1.9 Exfolierea [DeB97]

Detașarea sau exfolierea (figura 1.9) materialului de pe o suprafață întinsă a piesei injectate se realizează în special în jurul punctului de injectare. Delaminarea poate să apară și datorită incompatibilității materialelor amestecate la injectare sau când materialul este contaminat cu un altul [DeB97].

Cauzele apariției exfolierii sunt:

- Utilizarea excesivă a forței de închidere a matriței;
- Umiditate excesivă a materialelor. Umiditatea excesivă încălzită formează aburul ceea ce duce la delaminare pe suprafața piesei;
- Degradarea materialului. Acest lucru poate fi cauzat de viteza excesivă de injectare, timpul de menținere a temperaturii de injectare prea mare;
- Proiectarea incorectă a digurilor poate duce, de asemenea, la degradarea materialului;
- Utilizarea unui colorant necorespunzător.

Remediile privind reducerea exfolierii sunt:

- Reducerea sau eliminarea tensiunilor excesive;
- Eliminarea degradării excesive și diminuarea tensiunilor de forfecare;
- Mărirea punctului de injectare;
- Reducerea vitezei de injectare;
- Verificarea purității materialului și curățirea unității de plastifiere;
- Folosirea unui colorant corespunzător tipului de material;
- Timp prea îndelungat de staționare a materialului în matriță.

1.4.6. Variația dimensională a piesei

Variația dimensională este caracterizată prin dimensiunea piesei injectate variind de la lot la lot, sau de la injectare la injectare în timp ce setările mașinii rămân aceleași pentru aceeași piesă și același material. Depășirea limitelor de toleranță admise pentru abateri de formă, deviere evidentă de la forma geometrică prescrisă este inacceptabilă [HAW84].

Cauzele apariției defectului sunt:

- Contractie insuficientă, care rezultă din: variațiile materialului cum ar fi variațiile proprietăților, variațiile de umiditate;
- Proiectare defectuoasă a reperelor;
- Piese injectate prea calde în momentul extragerii;
- Extragere defectuoasă;
- Aruncătoare cu suprafața frontală prea redusă, în număr insuficient sau irațional dispuse (asimetric);
- Poziție greșită a canalului central de injecție;
- Aderența pieselor în unele puncte ale matriței;
- Tensiuni interne la piesele injectate;
- Variațiile contractiei;
- Deteriorarea unei garnituri a mașinii de injectare ceea ce produce instabilitate în sistem;

Remedii privind reducerea defectului:

- Eliminarea umidității excesive din matriță;
- Corectarea formei, a grosimii pereților nervuri de rigidizare incorect proiectate prin întărirea structurii cu nervuri de rigidizare (atenție la amplasarea acestora);
- Modificarea regimului termic al matriței;
- Reducerea temperaturii matriței;
- Prelungirea timpului de răcire;
- Se reglează viteza de circulație a apei de răcire;
- Verificarea funcționării dispozitivului de extragere (aruncare);
- Mărirea numărului de aruncătoare și verificarea dispunerii corecte a acestora;
- Modificarea plasamentului canalului central de injecție în matriță;
- Verificarea matriței eliminând eventualele corpuri străine și șlefuirea cu grijă a părților cu aderență;
- Reglarea presiunii de injecție și a temperaturii materialului și matriței;
- Optimizați proiectarea sistemului canalelor de distribuție;

- Alegerea unui sistem de etanșare adecvat;
- Verificați dacă garnitura este deteriorată sau uzată și înlocuiți-o;
- Temperatură constantă. Asigurați-vă că temperatura din matriță este constantă prin verificarea sistemului de răcire.

1.4.7. Decolorarea piesei

Decolorarea este un defect de culoare caracterizată prin culoare schimbată a piesei în comparație cu materialul original. Schimbări de culoare, depigmentare zonală sau extinsă la întreg volumul piesei [LEW94].

Cauzele apariției schimbărilor de culoare pot fi:

- Viteza excesivă de injectare, timpul de menținere sau temperatura de topire;
- Proiectarea rețelei de injectare poate duce, de asemenea la decolorarea materialului;
- Material insuficient de bine omogenizat;
- Viteza de dozare prea mare;
- Punct de injectare prea strâmt (supraîncălzire datorată frecării interne intense);
- Timp de staționare pe cilindru de plastifiere prea lung;

Recomandări pentru reducerea defectului:

- Optimizarea rețelei de injectare;
- Creșterea contra-presiunii la dozare și reducerea vitezei de rotație a melcului la dozare;
- Reducerea vitezei de injectare și a vitezei de dozare;
- Mărirea diametrelor digurilor;
- Reducerea timpului de staționare pe cilindru prin alegerea unei unități de plastifiere prea mici;
- Proiectarea necorespunzătoare a digurilor pieselor care ar putea provoca încălzirea excesivă, fapt care agravează forfecarea materialului deja supraîncălzit;
- Dimensiunea tipică a pieselor trebuie să fie între 20-80% din capacitatea de injectare a mașinii. Pentru materialele sensibile la temperatură, intervalul ar trebui să fie restrâns, în funcție de material;
- Se reduce temperatura, pentru a evita degradarea materialului prin supraîncălzire sau pentru a limita creșterea tensiunilor remanente din interior;
- Se optimizează presiunea sau viteza de injectare;
- Asigurarea unei ventilări corespunzătoare.

1.4.8. Variații de greutate

În majoritatea cazurilor, greutatea excesivă a piesei este o caracteristică nedorită. Aceasta crește costurile de producție datorită timpului de ciclu lung necesar pentru răcirea materialului în exces și de costurile suplimentare de materiale. Dimensiunile și greutatea pieselor injectate fluctuează de la o injecție la alta [OTT93].

Cauzele apariției variației de greutate pot fi:

- Uzura unității de plastifiere;
- Variația temperaturii matriței și a materialului;
- Uscarea insuficientă a materialului;
- Variația cursei de dozare și a presiunii ulterioare;
- Forța de zăvorâre (închidere) prea mică.

Recomandări privind evitarea defectului:

- Folosirea unei secțiuni de perete cu nervuri mai subțiri;
- Încercarea de a se echilibra fluxurile de curgere prin modificarea grosimii rețelelor mai lungi;
- Verificarea uzurii unității de plastifiere și mai ales a clapetei anti retur;
- Verificarea temperaturii matriței, a dispozitivului de încălzire și a termoreguletoarelor cilindrului de plastifiere;
- Majorarea forței de închidere.

1.4.9. Ochi de pește

Ochii de pește sunt defecte de suprafață care rezultă dintr-un material netopit împins în matriță cu fluxurile de curgere, materialul intrând astfel netopit în cavitatea matriței [BUS94].

Cauzele apariției acestui defect pot fi:

- Temperatura este prea joasă pentru a topi complet materialul iar materialul netopit va fuziona cu cel topit în fluxul de curgere;
- Forma și dimensiunea granulelor de material este neregulată, comparativ cu materialul original;
- Incompatibilitatea amestecului de materiale;
- Viteza de injecție mică;
- Stabilirea presiunii de injecție la o valoare prea mică.

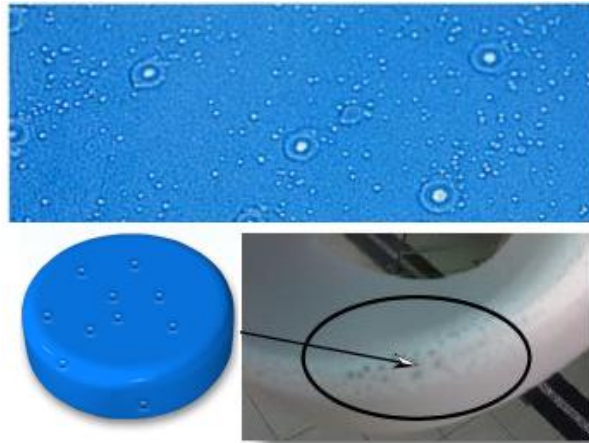


Fig. 1.10. Defectul ochii de pește [BUS94]

Recomandări pentru reducerea apariției defectului:

- Optimizarea temperaturii de topire și determinarea vitezei de rotație a melcului.

1.4.10. Bavuri în planul de separație

Bavurile se definesc prin formarea unei pelicule (lamele) de material plastic zonal sau pe întreg conturul piesei, în planul de separație conform figurii 1.11 [YOK94].

Bavurile apar atunci când un strat subțire de material este forțat să iasă din cavitatea matriței. Acest exces de material rămâne atașat la o piesă injectată în cuibul matriței și în mod normal trebuie să fie eliminat manual.

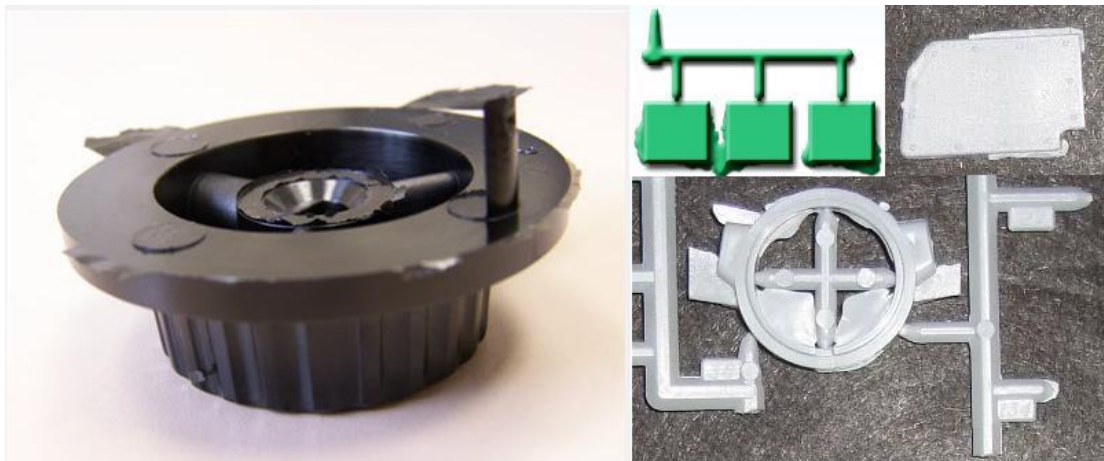


Fig. 1.11. Bavuri in planul de separație [YOK94]

Cauzele apariției defectului pot fi:

- Închiderea incorectă a matriței datorită:
 - ◆ Presiunii de închidere prea mică;
 - ◆ Rigiditatea matriței insuficientă;

- ◆ Suprafețe de închidere convexe;
- ◆ Uzura suprafețelor de închidere ale matriței.
- Parametrii de injectare necorespunzători (fluiditate prea mare indusă de temperatura prea ridicată, presiune prea mare):
 - ◆ Forța de închidere a matriței trebuie să fie mai mare decât presiunea de injectare pentru a menține matrița cât mai mult timp închisă;
 - ◆ Condițiile improprie de injectare. Una din cauze fiind vâscozitatea materialului, proiectarea canalelor de distribuție;
 - ◆ Ventilarea necorespunzătoare.

Recomandări pentru reducerea defectului:

- Asigurarea că plăcile matriței sunt corect montate și sunt sigilate în mod corespunzător;
- Curățarea planului de separație;
- Dacă are loc deformarea a unei plăci din matriță în timpul procesului de injectare, adăugați un pilon de sprijin;
- Utilizați recomandările de prelucrare ale furnizorilor de materiale pentru ventilarea corespunzătoare;
- Reducerea presiunii de injectare;
- Verificarea interstițiilor și micșorarea lor prin: creșterea forței de închidere a matriței, creșterea rigidității matriței refacerea (prin rectificarea) suprafețelor uzate ale matriței;
- Optimizarea parametrilor de injectare prin: diminuarea vitezelor de injectare și a temperaturii materialului, avansarea poziției punctului de comutare și diminuarea presiunii de menținere.

1.4.11. Linii de curgere concentrice, radiante din punctul de injectare

Se definesc prin linii (zone) mate concentrice cu punctul de injectare. Este un defect de suprafață sub formă de valuri circulare ce pot apărea lângă punctul de injectare [ROS93].

În figura 1.12 se pot vizualiza o serie de tipuri de linii de curgere.

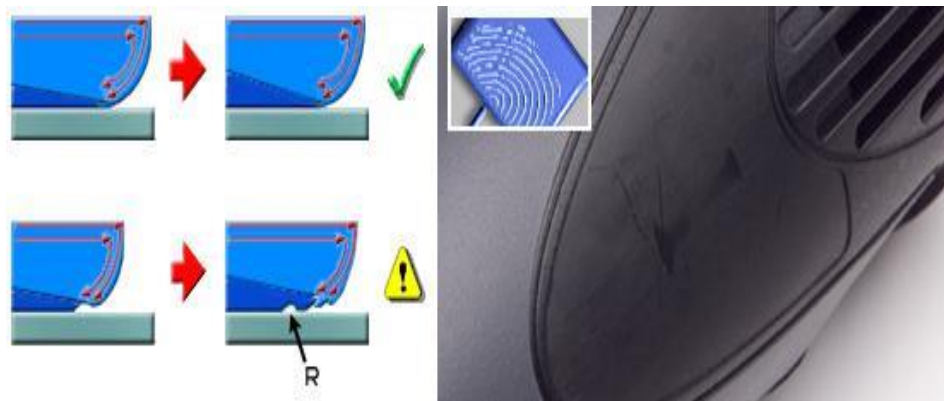


Fig. 1.12. Linii de curgere [ROS93]

Cauzele formării liniilor de curgere pot fi:

- Frontul de curgere a topiturii în matriță este stagnat datorită temperaturii materialului, temperaturii matriței sau a vitezei de injectare care sunt prea mici;
- Temperatura mică din matriță și viteza redusă de injectare poate determina răcirea prematură a frontului de topitură;

Recomandări pentru reducerea defectului:

- Optimizarea vitezei frontului de curgere a materialului în matriță prin: creșterea temperaturii materialului, creșterea temperaturii matriței și creșterea vitezei de injectare;
- Optimizarea vitezei melcului mașinii.

1.4.12. Probleme privind urme de jet in piesă

Jetul de polimer apare atunci când topitura este împinsa în matriță la o viteză mare prin zone restrictive cum ar fi duza, digul, rețeaua sau zonele mai groase ale piesei fără a se constitui contact direct cu peretele matriței [WIL75].

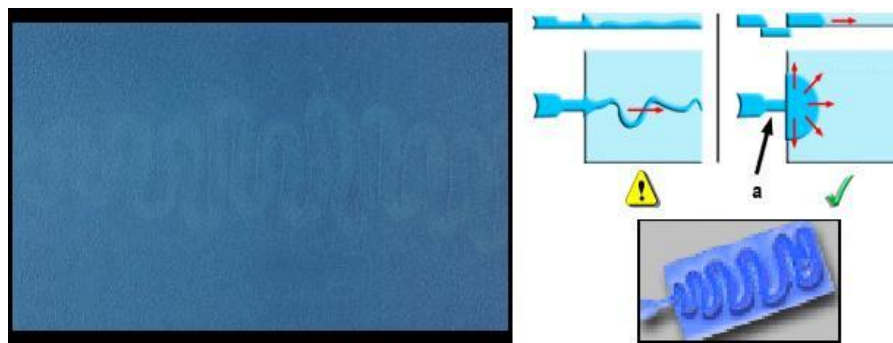


Fig. 1.13. Fenomenul de jet [MAT91]

Jetul cotit cu aspect de urmă de șarpe apare în punctele de contact ale materialului la scară redusă și în diverse movile din interiorul cavității. Efectul de jet duce la o slăbire a piesei, apariția unor pete la suprafața acesteia și o multitudine de defecte interne.

Cauzele apariției jetului pot fi:

- Viteză excesivă a melcului mașinii;
- Proiectarea inadecvată a sistemului de încălzire;
- Poziție inadecvată a digului. Lipsa de contact a topiturii cu matrița permite apariția fenomenului.

Recomandări pentru reducerea fenomenului:

- Proiectarea și poziționarea optimă a digului. Direcționarea topiturii înspre suprafață de metal a cuibului prin re poziționarea digului sau utilizarea unui dig submarin. Utilizarea unui dig cotit sau evantai pentru a încetini topitura cu un grad diferit pe suprafața de curgere. Acest lucru reduce posibilitatea de forfecare a materialului;
- Optimizarea vitezei melcului a mașinii. Utilizarea unei viteze optime a melcului astfel încât frontul de curgere al topiturii să aibă viteza mică în momentul traversării digului iar apoi să crească odată cu pătrunderea în cavitatea matriței.

1.4.13. Probleme privind injectarea rapidă/de scurtă durată (short shot)

Injectarea de scurtă durată duce la umplerea incompletă a unei cavități a matriței care duce la producerea de piese incomplete. În situația în care o piesă este realizată prin injectare de scurtă durată polimerul topit nu umple cavitatea. Frontul de curgere se solidifică înainte ca topitura să umple complet cavitatea în scopul obținerii piesei [KAN05].

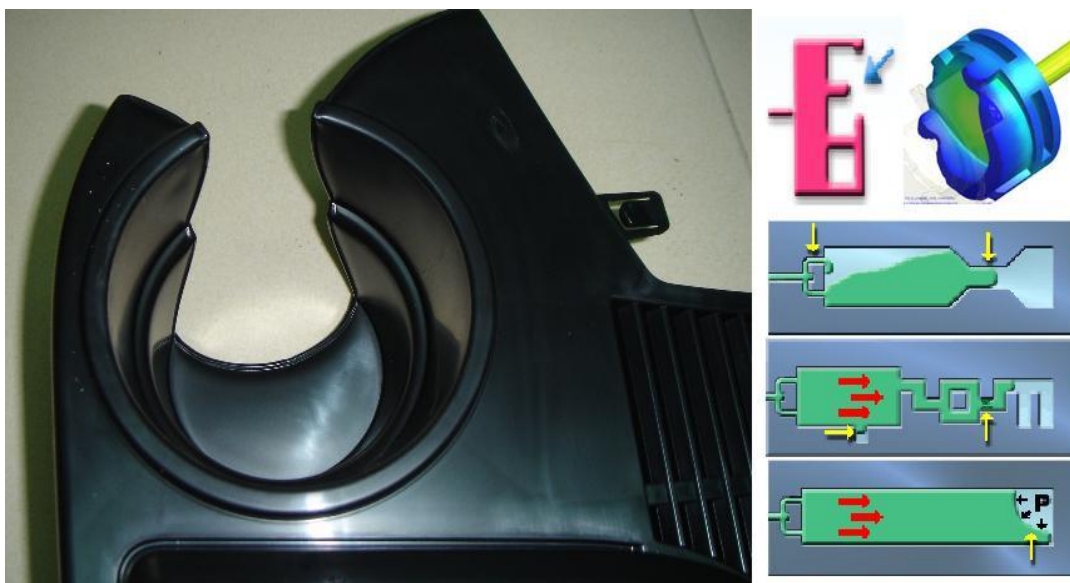


Fig. 1.14. Efectul de "Short shot" [KAN05]

Cauzele apariției defectului pot fi:

- Restricții privind curgerea. Datorită existenței a doua canale de curgere sau proiectarea deficitară a rețelei de injectat;
- Fenomenul de ezitare și canale de dimensiuni lungi sau complexe;
- Temperatură joasă a matriței și a topiturii;
- Ventilare insuficientă;
- Material insuficient care intră în matriță. O mașină subdimensionată, volumul scăzut de material injectat sau viteze inadecvate ale melcului mașinii;
- Defecte ale mașinii: o pâlnie de alimentare goală, valva antiretur defectă sau material solidificat în duză.

Remedii pentru reducerea apariției defectului:

- Evitarea fenomenului de ezitare al materialului;
- Eliminarea golurilor de aer. În cazul în care există goluri de aer ele ar trebui să fie poziționate în zone care pot fi ușor ventilate sau în zona aruncătoarelor astfel încât aerul să poată fi eliminat prin interstițiul dintre acestea și placă;
- Creșterea temperaturii matriței și a topiturii. Acest lucru va reduce vâscozitatea topiturii ceea ce face ca umplerea să se realizeze mai ușor;
- Creșterea presiunii de injectare la maxim pentru piesa din cauză;
- Creșterea vitezei melcului mașinii;
- Utilizarea unui material diferit la injectare;
- Modificarea geometriei piesei astfel încât piesele să fie umplute în același timp și la presiune egală. Dacă este nevoie se reduce complexitatea piesei sau grosimea pereților acesteia.

1.4.14. Goluri interioare și retasuri

Golurile interioare și retasurile din piese rezultă datorită unei contracții locale a materialului într-o secțiune mai groasă în care compensarea este insuficientă.

Golurile interioare apar pe piesele injectate sub forma unor depresiuni sau adânciri, ele fiind în general foarte mici. Aceste defecte sunt adesea destul de vizibile, datorită faptului că reflectă lumina în diferite direcții ale piesei. De asemenea aceste defecte, deși nu afectează durabilitatea sau funcționalitatea pieselor, ele sunt percepute ca fiind defecte severe de calitate [SCH02].

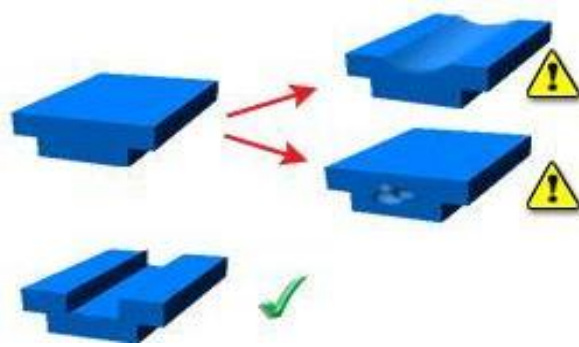


Fig. 1.15. Retasuri [SCH02]

Acestea pot fi alcătuite dintr-o singură cavitație sau dintr-un grup de cavitații mai mici. Retasurile pot să aibă un impact puternic asupra performanței structurale a pieselor.

Găurile interioare sunt cauzate, de regulă, datorită contracției termice din timpul răcirii. După ce materialul injectat, respectiv piesa s-a răcit și solidificat în porțiunile mai subțiri urmează răcirea materialului în porțiunile unde pereții sunt mai groși. Datorită contracției pereților pe suprafața piesei pot să apară diferite cavitații. În cazul în care învelișul piesei este destul de rigid deformarea pereților piesei poate fi înlocuită prin apariția unei retasuri [HU94].

Cauzele apariției acestui defect pot fi:

- Caracteristici geometrice speciale, golurile apar la matrițele cu pereți subțiri, în zona nervurilor, bosajelor sau filetelor interioare;
- Contractie ridicată;
- Compensarea insuficientă a materialului injectat. Înghețarea materialului în zona digului sau presiunea scăzută de menținere a piesei în matriță;
- Timp redus de răcire sau menținere;
- Temperatura prea mare a materialului sau matriței.

Remedii pentru reducerea apariției acestor defecte:

- Optimizarea presiunii de menținere;
- Schimbarea geometriei piesei;
- Reducerea contracției volumetrice;
- Amplasarea digurilor la zonele cu probleme;
- Utilizarea unui material diferit;
- Optimizarea rețelei de injectare a sistemului cu canale calde (hot runner). Proiectarea unor rețele restrânse poate duce la solidificarea prematură a materialului în apropierea digului.

1.4.15. Liniile de sudură și linii de întâlnire

O linie de sudură sau de întâlnire este un defect de injectare vizibil creat atunci când două sau mai multe fronturi de curgere se îmbină. Liniile de sudură pot fi cauzate de materialul care curge în jurul unor orificii sau inserții în piese, la injectarea punctiformă sau la piese cu grosimea de perete variabilă. În cazul în care un front de curgere se răcește înainte de întâlnirea cu celelalte, acestea nu se vor îmbina corespunzător provocând o slăbire a piesei în zona injectată, defecte ce pot să apară sub forma de linie, șanț sau culoare modificată a piesei [GUA07].

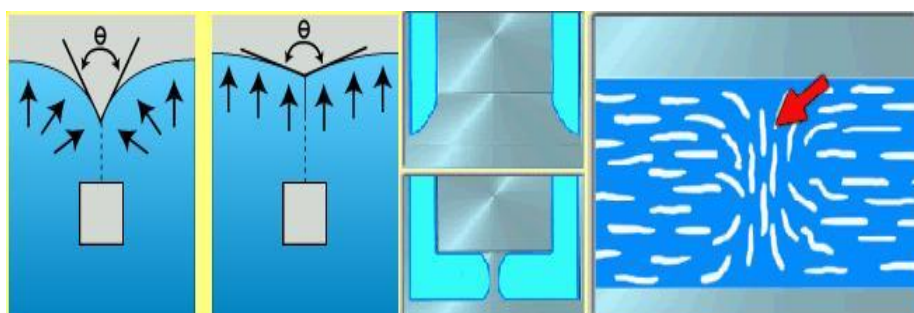


Fig. 1.16 Liniile de sudură și de curgere [GUA07]

Diferența dintre liniile de sudură și liniile de curgere este determinată de unghiul la care se întâlnesc fronturile de curgere.

Aceste defecte apar atunci când se formează o linie de sudură pe straturile subțiri ale fronturilor de curgere care se amestecă, se topesc și apoi se răcesc cu restul de material.

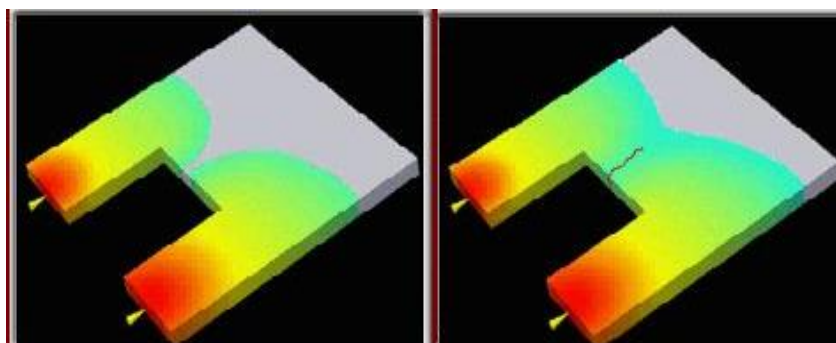


Fig 1.17 Orientarea plasticului [YU90]

Orientarea plasticului la liniile de sudură este de obicei perpendiculară pe direcția curgerii. În figura 1.16 se poate observa modul în care se întrepătrund două fronturi de curgere și nealinierea moleculelor polimerului.

O linie de întâlnire apare atunci când două fronturi de curgere se îmbina la un unghi oblic. Orientarea moleculelor din plastic este mai uniformă decât în cazul unei linii de sudură. Liniile de întâlnire sunt în mod normal mai puternice decât liniile de sudură și sunt adesea mai puțin vizibile.

Liniile de sudură și cele de întâlnire ce se găsesc pe o piesă pot provoca probleme structurale și pot fi neacceptate la controlul vizual. Liniile de sudură și cele de întâlnire ar trebui să fie evitate pe cât posibil. În cazul în care la injectare se utilizează curgerea prin rețele neechilibrate pot apărea aceste defecte. Remedierea acestor defecte se poate face prin schimbarea locației injectării sau prin modificarea grosimi de perete pentru a obține un timp de umplere diferit. Având un timp de umplere diferit, fronturile de curgere se pot întâlni într-o altă locație astfel încât liniile de întâlnire sau sudură se vor muta [YU90].

Pentru limitarea apariției fenomenului se recomandă:

- Schimbarea poziției de injectare;
- Schimbarea grosimii de perete a pieselor;
- Mărirea temperaturii matriței sau a topiturii;
- Optimizarea rețelei de injectare.

1.4.16. Probleme de deformare

Deformarea apare atunci când există variații ale tensiunilor interne în material cauzat de o contracție variabilă. În general piesele deformate nu sunt acceptate din punct de vedere calitativ. Fenomenele ce duc la deformarea pieselor realizate din materiale plastice sunt contracția și răcirea diferită pe suprafața piesei și problemele de orientare ale materialului topit care pot fi paralele sau perpendiculare pe direcția deformatei [KEN95].

Cauzele apariției deformării pot fi:

- Răcire neuniformă. În cazul unor diferențe de temperatură a matriței, piesa se poate contracta diferit ceea ce duce la tensiuni interne și la apariția defectului.
- Contracție inconsistentă. Aceasta rezultă din :
 - ◆ variații ale materialului cum ar fi diverse proprietăți, umiditatea diferită, topitură inconsistentă și pigmentație;
 - ◆ condițiile de proces cum ar fi variațiile de presiune inconsistente și temperaturi diferite ale materialului sau matriței;
 - ◆ mașina de injectat are probleme cu inelul de presiune deteriorat și control instabil al procesului.

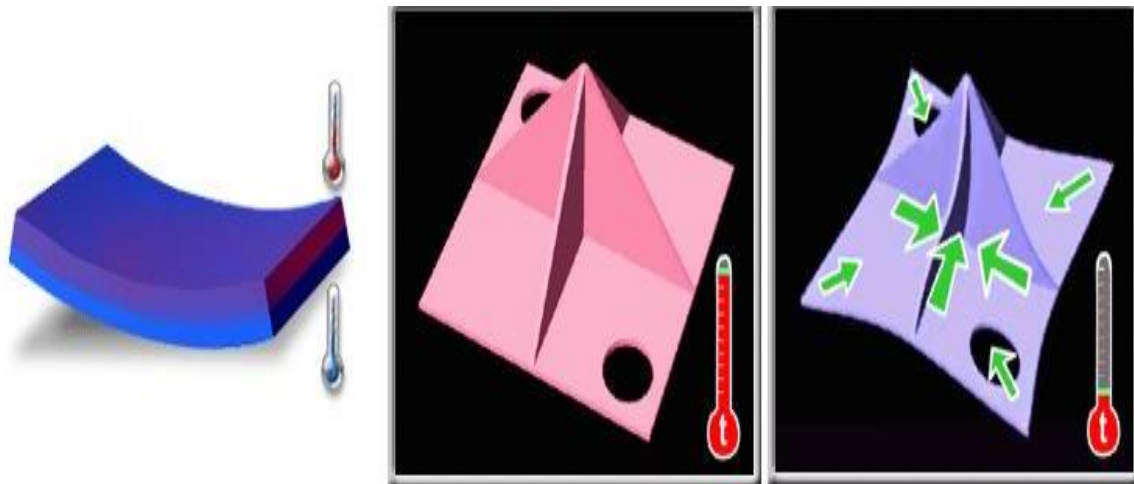


Fig.1.18. Deformări [KEN95]

Remedii pentru reducerea apariției defectului:

- Minimizarea contracției diferențiate;
- Minimizarea efectelor privind orientarea cu referire la poziția digurilor pentru o curgere unidirecțională și modificarea grosimii piesei;
- Modificarea geometriei piesei. Adăugarea unor îmbunătățiri pieselor proiectate prin introducerea unor nervuri de rigidizare;
- Utilizarea unor piese cu pereți subțiri cu nervuri. Se recomandă pereți mai groși doar în acele secțiuni care necesită o stabilitate structurală mare și care nu poate fi realizați utilizând altă metodă;
- Schimbarea materialului. Cele semi-cristaline au contracții naturale mari fiind așadar predispuse la deformare.

Dacă se dorește remedierea defectelor de acest gen pentru cazul răcirii diferențiate se recomandă utilizarea unor inserții în matriță sau schimbarea traseului sistemului de răcire al matriței. Probabil că cea mai simplă metodă utilizată este modificarea temperaturii lichidului de răcire al matriței. Temperatura cu care se lucrează este de 5* mai mare sau mai mică decât temperatura inițială a procesului. Dacă acest lucru nu este suficient se pot adăuga linii suplimentare de răcire destinate porțiunilor cu probleme sau complicate ale matriței și chiar diverse inserții [WAN86].

Pentru defectele datorate contracției materialului se vor reduce variațiile mari de perete ale pieselor și se vor ține seama de modul de asamblare al pieselor ce urmează a fi realizate. Utilizarea unor profile de asamblare pe mașinile de injectat pentru reducerea contracției piesei care poate fi limitată sau separată de timpul de răspuns al mașinii precum și de componentele

acesteia. Avantajul utilizării unui profil de asamblare pentru reducerea deformațiilor este că acesta nu implică modificări de proiectare ale piesei [DAL07].

Dacă se ia decizia de reducere a pereților piesei proiectate, cu condiția că este cea mai bună soluție pentru reducerea deformațiilor piesei, trebuie să se reanalizeze modelul studiat. Procesul de modificare a pereților piesei poate fi unul iterativ și se poate folosi acesta până la nivelul la care contracția diferențiată este acceptabilă.

În cazul reducerii deformațiilor cauzate de efectele de orientare, eliminând condițiile de material se pune accent pe amplasarea punctului de injectare, grosimea pereților piesei și condițiile de injectare. Orientarea mai poate fi cauzată de efectele combinate ale forfecării materialului și solidificarea acestuia.

Modificarea condițiilor de injectare poate să reducă orientarea prin schimbarea temperaturii matriței, a topiturii, timpului de injectare, presiunii de menținere, etc. În contrast cu celelalte două moduri de remediere, acesta nu necesită modificări ale modelului sau matriței fiind opțiunea cea mai puțin costisitoare [HAT91].

Schimbarea locației de injecție se utilizează dacă condițiile de injectare modificate nu dau rezultate pozitive. Schimbarea locației de injectare nu afectează de obicei designul piesei ci permite injectarea diversă pentru piesele cu o geometrie complexă și grosimi de pereți variabili. Modificările diverse în cazul digurilor nu afectează aspectul matriței decât dacă se consideră că este nevoie să se utilizeze un dig de tip film sau evantai, caz în care geometria se va modifica. Dacă se decide modificarea digului piesei este obligatoriu să se realizeze o analiză de curgere într-un program CAE [DAL07].

Modificarea pereților piesei pentru reducerea efectelor de orientare a modelului ce se dorește să fie obținut se bazează pe modificarea dimensiunilor peretelui în zonele critice urmat de o analiză a modelului.

1.4.17. Umplere incompletă a matriței

Umplerea incompletă se manifestă atunci când frontul de curgere încetinește sau chiar se oprește pe o direcție specifică de curgere. Dacă materialul plastic ce umple o cavitate are posibilitatea de trecere prin secțiuni subțiri sau groase a unei piese, topitura tinde să completeze secțiunea groasă mai întâi, ceea ce duce la o rezistență slabă de curgere în secțiunea subțire. Acest lucru poate duce la oprirea sau încetinirea în mod semnificativ a curgerii din secțiunea subțire a piesei. Odată ce topitura încetinește ea se va răci mai repede ceea ce duce la o creștere a vâscozității. Această vâscozitate crescută a materialului va inhiba curgerea, iar rezultatul fiind o răcire mai rapidă a piesei în această zonă. Fenomenul de

umplere incompletă poate apărea în nervurile pieselor și în secțiunile subțiri la piese care prezintă schimbări majore de grosime ale peretelui [KAM88].

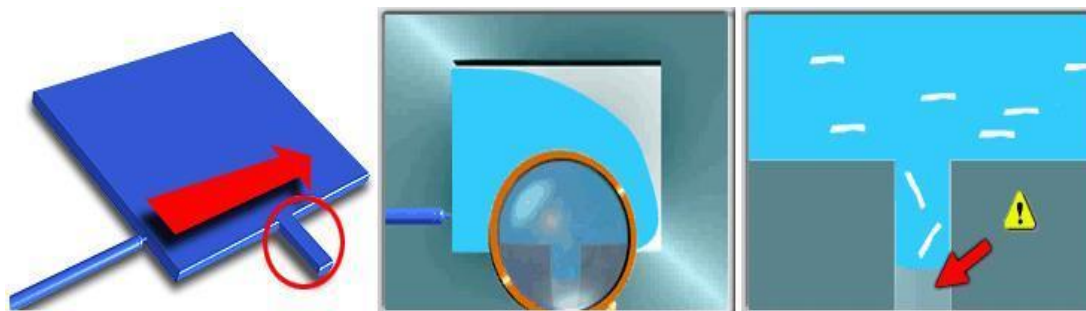


Fig. 1.19. Fenomenul de umplere incompletă [CHI05]

În figura 1.19. nervura încercuită de culoare roșie oferă o rezistență ridicată la umplere deoarece este cu mult mai subțire decât restul piesei. Rezultatul este o umplere incompletă a piesei datorită locației de injectare. Astfel se observă că piesa este incompletă, nervura subțire nu s-a umplut [CHI05].

Atunci când nu există altă alternativă privind ruta de curgere, frontul de topitură v-a fi ca în figura următoare (fig. 1.20.) iar curgerea continuă v-a umple fără probleme nervura. Din figura 1.20 se observă că punctul de injectare ales asigură o curgere uniformă și corectă a materialului topit ceea ce face ca acesta sa umple cu succes cavitatea [KAM88].

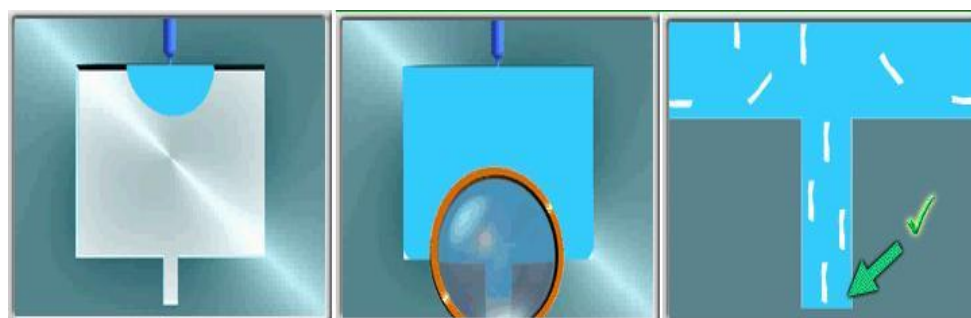


Fig. 1.20. [CHI05]

Fenomenul de umplere incompletă poate reduce calitatea piesei datorită apariției variației de presiune pe suprafață slabă, tensiuni ridicate și orientarea neuniformă a moleculelor. În cazul în care fenomenul permite frontului de curgere să înghețe complet cavitățile din matriță pot să rămână neumplute [CHI05].

Recomandări privind evitarea fenomenului de umplere incompletă:

- Mutarea punctului de injectare în afara ariei de ezitare;
- Modificarea punctului de injectare și plasarea acestuia într-o zonă în care presiunea aplicată v-a fi maximă;
- Creșterea grosimii peretelui unde umplerea a avut loc, pentru a reduce rezistența la curgere;
- Injectarea să se facă rapid;
- Creșterea temperaturii materialului;
- Utilizarea unui material puțin vâscos, cu un indice de topire mai ridicat.

1.4.18. Constrația volumetrică

Constrația de volum este constrația de polimer datorată schimbării de temperatură de la o temperatură de topire la temperatura ambiantă a piesei. O constrație de volum ridicată poate provoca deformații ale piesei cum sunt: urme de curgere, dimensiuni care sunt prea mici și goluri interne. Grosimea excesivă de perete și o presiune de menținere inadecvată a piesei pot contribui la constrațiile de volum [SER01].

Pentru a reduce constrația de volum a pieselor se recomandă:

- Reproiectarea piesei prin reducerea pereților acesteia;
- Reproiectarea matriței prin modificarea poziției digului;
- Modificarea parametrilor procesului de injectare prin mărirea presiunii de menținere.

1.4.19. Probleme datorate efortului la forfecare [CRO79]

Efortul de forfecare este o forță aplicată topiturii în timpul curgerii în matriță. Acest tip de stres este cauzat de frecarea excesivă între straturile de polimer care curg în cavitate. Acest lucru se poate întâmpla atunci când vâscozitatea materialului este ridicată sau ciclul de curgere al materialului este crescut (figura 1.21).

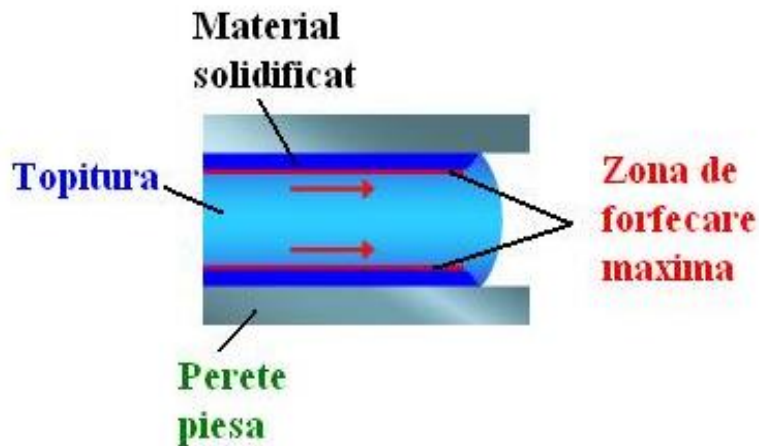


Fig. 1.21. Exemplu de forfecare [SER01]

Linia roșie în figură reprezintă zona de forfecare maximă a materialului. Acest lucru este evidențiat de stratul albastru închis al topiturii și de stratul albastru deschis. Tensiunile ridicate de forfecare pot să apară în jurul digului din cauza vitezelor ridicate de injectare și la sfârșitul curgerii dacă se utilizează un debit constant de topitură. Tensiunea ridicată de forfecare poate provoca degradarea piesei și crăparea acesteia.

Pentru reducerea efectului de forfecare din interiorul piesei se reduce rata de curgere, se măresc grosimile pereților se evită orientarea și contracția diferențială.

1.4.20. Acumulare de material

Acumularea de material apare atunci când materialul polimeric este comprimat suplimentar într-o parte a piesei în timp ce aceasta se umple complet.

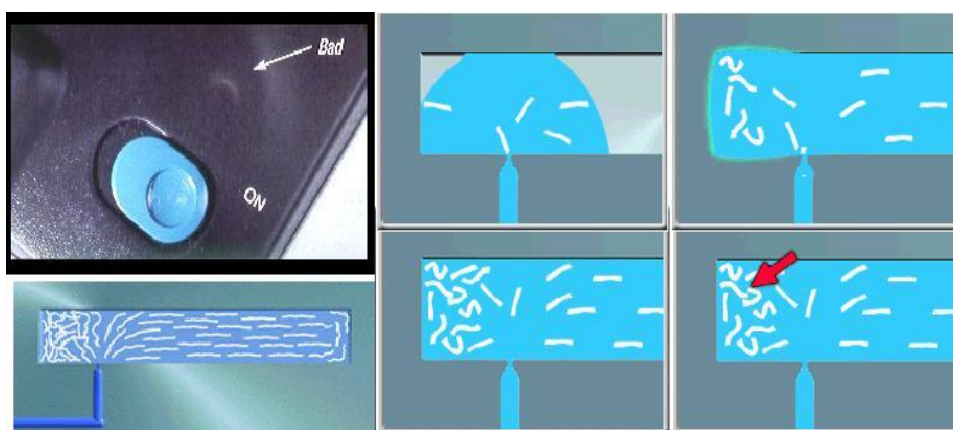


Fig. 1.22. Acumulare de material și cauzele apariției acesteia [KIM03]

Fenomenul apare atunci când cea mai simplă porțiune de curgere se umple prima dată. Odată ce această porțiune este completă ea va rămâne în continuare sub presiune până când

materialul plastic umple restul de cavitate rămasă. Această presiune va împinge mai mult material în zona deja umplută determinând-o să aibă o densitate mai mare și o contracție mai mică decât în alte regiuni. Solidificarea piesei în această porțiune se face astfel sub presiune. Problemele cauzate de acest fenomen sunt: deformare datorită unei contracții neuniforme, greutate ridicată a piesei datorită materialului comprimat și o distribuție neuniformă a densității din întreaga piesă [KAM88].

Recomandări privind reducerea apariției fenomenului:

- Părțile înguste sau subțiri ale modelului trebuie să acționeze ca ghid de curgere;
- Se recomandă ca punctul de injectare să fie așezat într-o poziție care va defini o curgere echilibrată a materialului;
- Se împarte cavitatea în secțiuni imaginare și se folosește o singură locație de injectare pentru fiecare secțiune;
- Sunt eliminate digurile inutile.

1.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-au definit principalele materialele polimerice folosite în industria auto și s-au prezentat elementele componente care intră în procesul de fabricație a materialelor plastice finite. Un element important în cadrul cercetărilor întreprinse este cel de a cunoaște îndeaproape evoluția materialelor polimerice compozite, structura și performanțele lor, putând astfel stabili o direcție clară de cercetare prezentă și viitoare.

Faza de concepție și proiectare a materialelor polimerice este mult mai complexă decât metodologia clasică a proiectării pieselor executate din materiale tradiționale metalice. Astfel, ea cuprinde atât stabilirea formei, a dimensiunilor, a structurii și a tehnologiei de fabricație a pieselor pentru ca în final aceasta să corespundă tuturor exigențelor impuse de condițiile de funcționare. Proiectarea materialelor plastice se face ținând cont de natura mediului de funcționare a pieselor cât și de cerințele de calitate.

Calitatea pieselor injectate din material plastic este o cerință foarte importantă în mediul industrial actual. În cadrul acestui capitol s-au definit principalele defecte care pot să apară la o piesă produsă prin injectare în matriță din material polimeric, respectiv recomandările privind reducerea apariției defectelor.

Capitolul 2

Cercetare teoretică privind corelarea dintre tehnica microinjectării și injectarea pieselor cu pereți subțiri cu tehnica simulării computerizate a curgerii în spațiile cuibului matriței și cu analiza experimentală a parametrilor ce influențează umplerea cavității

În acest capitol se vor prezenta cercetări privind calitatea și dimensiunile minimale obținute la injectarea pieselor miniaturale și cu pereți subțiri. Se mai prezintă metode matematice de analiză și de prelucrare a datelor experimentale.

2.1. Definirea injectării pieselor miniaturale și cu pereți subțiri

Injectarea pieselor miniaturale și cu pereți subțiri este definită în mod convențional ca injectarea pieselor care au o grosime 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 [MAD02].

Grosimea stratului de material depus pe perete fiind aceeași, diferențele dintre injectarea clasică și injectarea cu pereți subțiri se remarcă la nivelul secțiunii libere de curgere (figura 2.1). Progresele sistemelor de control ale procesului au permis utilizatorului supervizarea mai atentă asupra întregului proces de injectare, rezultând fabricarea de piese de dimensiuni foarte precise, în limitele joase de toleranță [SNY99].

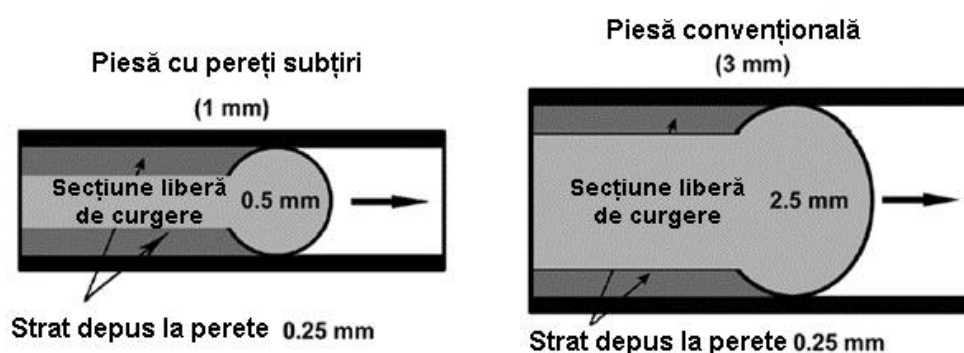


Fig. 2.1. Diferența dintre injectarea pieselor cu pereți subțiri și injectarea clasică [GHA 06], [SMI 98]

2.2. Piese obținute prin micro injecție

Analiza pieței microsystemelor 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.) [TOS 02]. Chiar dacă piesele din polimeri nu domină piața acestor produse (întâietatea deținând-o siliciul), totuși ele se comportă excelent în domenii precum tehnica medicală, biotehnologie sau în producția de componente plastice pasive pentru rețelele optice. Exemple de piese obținute prin microinjectare sunt micromotoare, roți dințate, comutatoare optice, senzori ai glicemiei și ai tensiunii arteriale precum și componente pentru chirurgia minimal invazivă (figura 2.2) [WHI06].



Fig. 2.2. Repere produse prin microinjectare [KEM 00]

Se întrevide dezvoltarea pieței pieselor microstructurale (de dimensiuni până la 100 μm), estimându-se atingerea unor valori de mai multe miliarde de dolari. În acest context, injectarea în matriță rămâne cel mai uzual și eficient proces de producție de masă, chiar și în domeniul componentelor miniaturizate [MAL04].

Pachetele software special concepute pentru asistarea proceselor de injectare în matriță 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 simulate umplerea cavităților de formare ale matriței, post umplerea, contracția sau deformarea pieselor din materiale plastice, injectarea în matrițe 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 [DES99]. 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 [SCH02].

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 reperi 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 [MEN91, BAC95] 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, reperele injectate prin intermediul acestei tehnologii sunt considerate a fi cele mai fine structuri existente pe piață (figura 2.3).

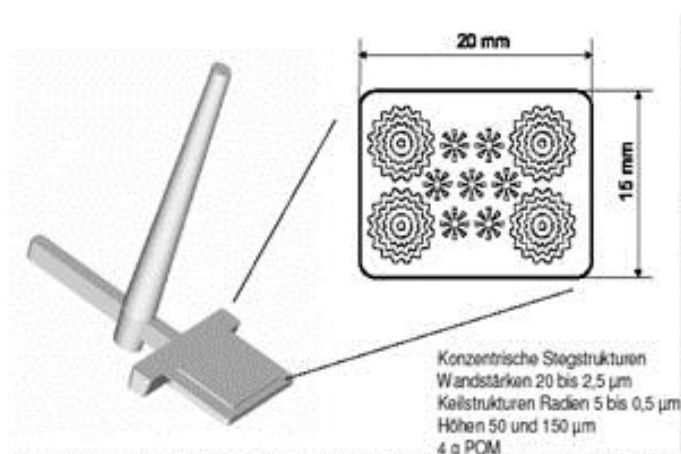


Fig. 2.3. Rețea fină de canale LIGA – studiu reologic de umplere a microcavităților [SCH 03]

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 $2,5 \mu\text{m}$ și $20 \mu\text{m}$ (figura 2.4) și sunt montate deasupra unei plăci de bază, fiind umplute cu material printr-un sistem de canale de curgere clasic.

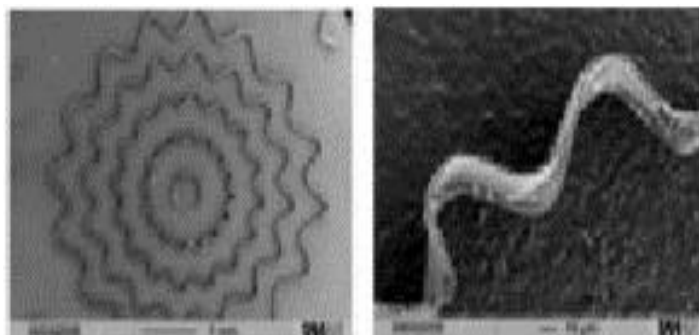


Fig. 2.4. Rezultatele injectării POM [KEM 00]

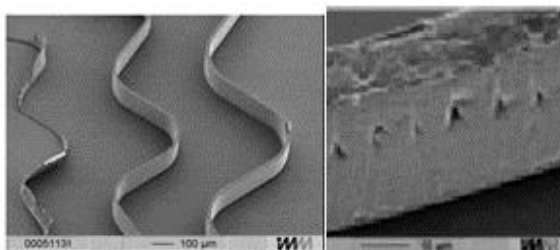


Fig. 2.5. Rezultatele injectării PPS [KEM 00]

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 pot fi sub $0,05...0,15 \text{ mm}$. Piese mici, de precizie, pot fi realizate cu toleranța de $\pm 0,05 \text{ mm}$, iar pentru dimensiuni mai importante se poate asigura un câmp de toleranță mai restrâns dar nu sub valoarea de $\pm 0,02 \text{ mm}$. 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 $\pm 0,005 \text{ mm}$ [MOT06].

2.3. Dimensiunile minimale obținabile ale unui cuib al matriței folosit la fabricarea unor piese miniaturale [YU04]

Datorită proprietăților lor unice, polimeri au fost utilizați tot mai mult într-o gamă largă de aplicații, inclusiv macro și micro-dispozitive. În scopul de a extinde domeniul de microinjectare (μIM) pentru dispozitive pe bază de polimeri, este important să se introducă tehnici eficiente pentru fabricarea de microstructuri polimerice la un cost scăzut și cu mare precizie. În ultimii ani, au fost propuse o serie de tehnologii pentru replicare a microstructurii polimerice, inclusiv procesul LIGA [MEN91, BAC95], care utilizează o embosare caldă [BOT95] sau de formare prin injecție [RUP95] pentru a replica microstructuri polimerice. Inserții LIGA fabricate prin procesul de litografie cu raze X, oferă posibilitatea de a produce microstructuri cu geometrie arbitrară dintr-o varietate de materiale, cum ar fi metale, polimeri și ceramică prin diverse procedee de injecție. Printre diferite tehnici de formare a produselor, matrițarea prin injecție este cea mai folosită deoarece are avantajul prețului scăzut și oferă o precizie înaltă pentru producția în masă.

În acest subcapitol se investighează comportamentul de curgere a topiturii de polimer în cavitatea micro-matriței și se stabilesc strategiile necesare pentru a adapta procesul tradițional de formare prin injecție pentru replicarea microstructurii polimerice. În primul rând, aplicarea directă a procesului de formare prin injecție convențională în replicarea microstructurii polimerice sunt analizate utilizând programul de simulare C-MOLD.

Diferite combinații de parametri de proces sunt apoi simulați pentru a investiga comportarea fluxului de topitură de polimer, relația dintre parametrii procesului și calitatea microstructurii injectate. Folosind aceste rezultate, cei mai importanți parametri pot fi identificați și pot fi propuse posibile strategii de prelucrare pentru a testa fezabilitatea simulării. În final, trei strategii sunt alese și sunt aplicate în matriță pentru a evalua validitatea acestora.

2.3.1. Proiectarea și fabricarea matriței [YU04]

O matriță este fabricată din aluminiu pentru procesul de injecție. Matrița de aluminiu, este formată dintr-o cavitate principală cu două părți mobile (figura 2.6). Părțile mobile încorporează cavitatea în care este ținută o plachetă de siliciu de 4 inch cu microstructuri prelucrate în material și care este folosită ca inserție în matriță.

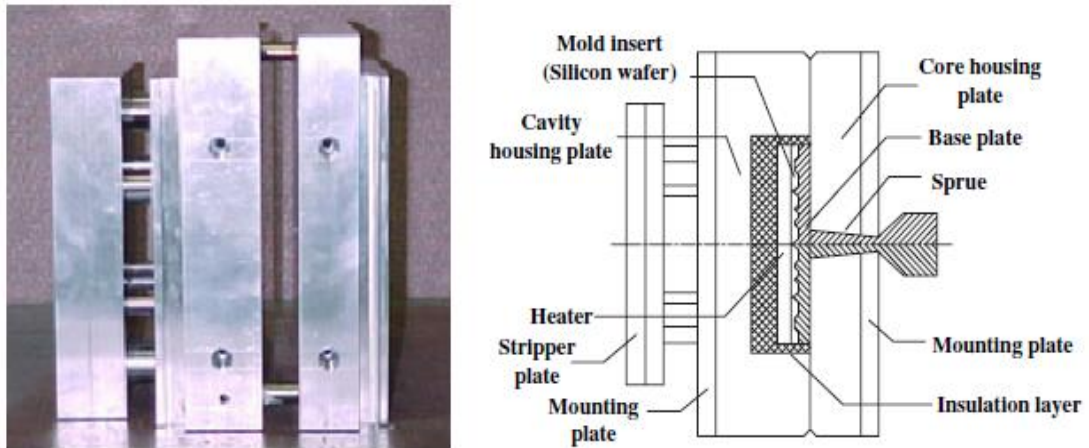


Figura 2.6 Matrița și componentele aferente YU04]

În figura 2.7 se prezintă placheta de siliciu care este gravată pentru a avea o adâncime a cavității de 110 μm . Cavitățile pătrate au deschideri de 320 μm , 160 μm , 80 μm și 40 μm și sunt produse cu ajutorul gravării anizotrope în siliciu din materialul TMAH (hidroxid de tetrametil-amoniu). Un încălzitor este instalat în matrița de injecție pentru a controla temperatura în timpul procesului de injectare.

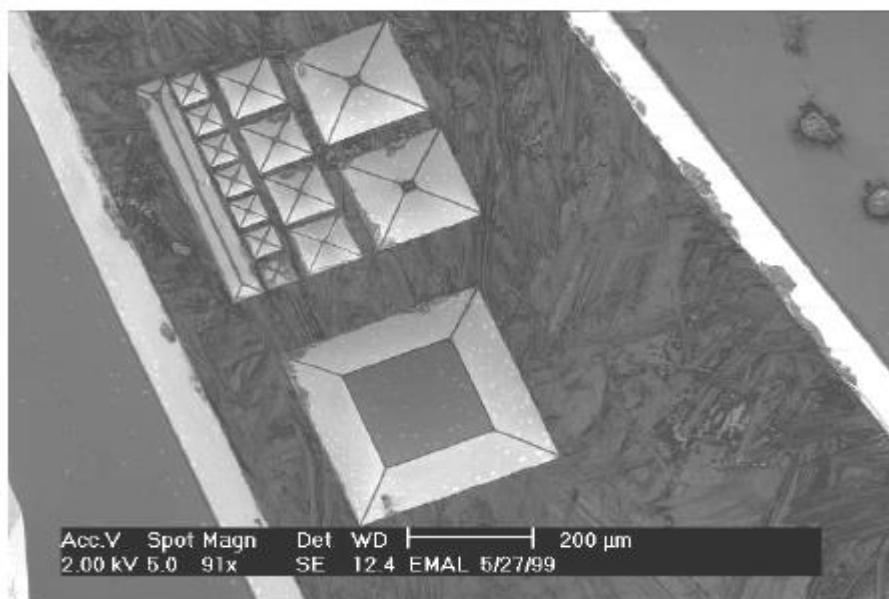


Figura 2.7 Microstructuri în matrița de siliciu [YU04]

Pentru a avea o mai bună conductivitate termică și un timp de răcire mai scurt, s-a folosit o matriță de aluminiu, care este mai ușor de fabricat și modificat. În plus, cu o izolație termică adecvată și un sistem de răcire, problema variației dimensionale cauzate de dilatare termică poate fi controlată astfel încât o matriță de aluminiu poate fi utilizată ca o variantă mai economică în procesul de injectare.

S-a utilizat o mașină de injectat Arburg Allrounder 221M 350-75 convențională cu un singur piston, folosind procedeul de injecție la rece. Materialul utilizat pentru studiile experimentale este Bayer Makrolon 2205 o rășină din policarbonat (PC) termoplastic. Datorită proprietăților sale excelente optice, chimice și mecanice, PC poate fi folosit în aplicații cum ar fi instrumente medicale, senzori și sisteme de stocare a datelor.

Polimerul este injectat în cavitatea matriței la o presiune cuprinsă între 40 și 50MPa. Temperatura PC din zona de umplere este menținută la aproximativ 300 °C. Temperatura matriței este controlată de un încălzitor și menținută sub valoarea de 200 °C. Timpul ciclului de injecție este de 65s, iar topitura de polimer din matriță este lăsată să se răcească timp de 30s după etapa de umplere.

2.3.2. Simularea umplerii matriței [YU04]

Este bine cunoscut faptul că proiectarea asistată de calculator (CAE) poate îmbunătăți tehnicile proces-și-eroare și poate fi folosită pentru a prezice comportamentul de curgere din matriță. În mod ideal, analiza CAE oferă o imagine care este utilă în proiectarea pieselor, matrițelor și a proceselor de formare. Prin utilizarea analizei CAE de a evalua modele și materiale alternative, inginerii pot proiecta și analiza o matriță relativ rapid și cu costuri relativ mici.

Programul CAE C-MOLD dezvoltat de AC Tehnologies este folosit ca instrument de calcul numeric. Soluțiile numerice sunt bazate pe un element finit / metodă hibridă a diferențelor finite pentru a calcula presiunea, debitul și temperatura împreună cu o metodă de control volumică pentru a urmări mișcarea fronturilor topiturii. O rețea cu element finit este folosită pentru a aproxima placa de bază circulară, formă cu microstructuri convexe pe o suprafață. Următoarele condiții sunt luate în considerare în această lucrare pentru a controla și investiga procesul de matrițare prin injecție:

- *Timpul de umplere / viteza de injecție.* În scopul de a genera o orientare moleculară uniformă în întreaga piesă, se recomandă să se mențină o viteză constantă la duza de injecție. Cu toate acestea, doar mașinile avansate de injecție au capacitatea de a realiza acest lucru. În programul C-MOLD, se pot seta fie timpul de umplere fie presiunea de injecție, pentru a controla secvența de proces;
- *Temperatura matriței.* Se crede că efectele de suprafață vor domina comportamentul de curgere la scară microscopică și că temperaturile sunt cheia care determină proprietățile fluidului, cum ar fi: vâscozitatea, căldura specifică

și conductivitatea termică. Cu toate acestea, o temperatură înaltă poate provoca degradarea policarbonatului, astfel încât temperatura topiturii maxim admisibilă trebuie predefinită în procesul de simulare;

- *Grosimea plăcii de bază.* Placa de bază este utilizată pentru a sprijini microstructurile și grosimea plăcii de bază va afecta echilibrul de topitură de polimer și calitatea rezultatelor obținute. Deoarece grosimea plăcii de bază este mult mai mare decât deschiderea individuală a micro-cavității, necesită o analiză atentă a procesului de injectare;
- *Profunzime-la-deschidere.* Dimensiunile micro-cavității determină efectul rezistența la curgere și de transfer de căldură. În această lucrare, adâncimea deschiderii este raportul dintre structurile de injectare (adimensionale) și este folosit pentru a descrie calitatea procesului de injectare;

S-au obținut mai multe rezultate ale simulărilor [YU04]. Microcavități pătrate cu deschideri de 100 μm , 200 μm , 300 μm și la 400 μm sunt utilizate pentru a investiga procesul de formare prin injecție. În primul rând, un caz simplu este folosit pentru a investiga posibilitatea utilizării tehnicilor tradiționale de formare prin injecție pentru a fabrica microstructuri. În acest caz nu sunt folosite sisteme de răcire sau de încălzire astfel încât temperatura matriței este egală cu temperatura ambiantă. Rezultatele acestui prim caz sunt prezentate în figura 2.8 unde a fost folosit un timp de umplere de 1,5 s.

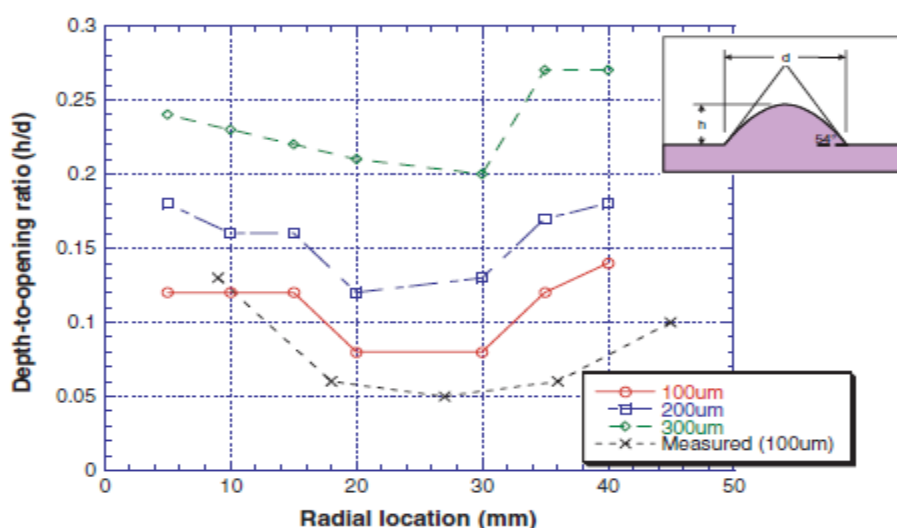


Figura 2.8 Rezultatele simulării cu temperatura matriței de 25 °C și timpul de umplere 1,5 s) măsurate la cavitățile de 100 μm [YU04]

Mai mulți factori, inclusiv de timpul de umplere și grosimea plăcii de bază sunt investigați. În figura 2.9 se prezintă rezultatele simulării dintre timpul de umplere și rapoartele profunzime-la-deschidere. Cum era de așteptat, timpul de umplere mai scurt, ceea ce înseamnă o presiune de injecție mai mare și viteza de injecție mai rapidă, va genera microstructuri cu rapoarte mai mari de adâncime-la-deschidere.

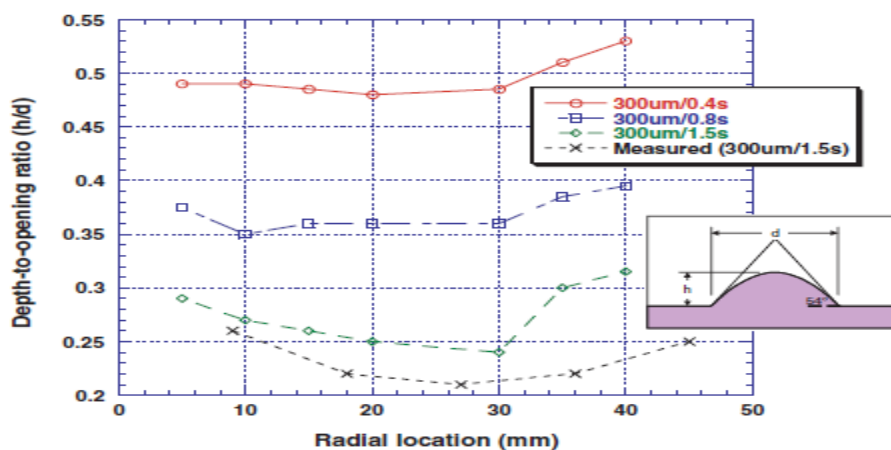


Figura 2.9 Rezultatele simulării cu diferiți timpi de umplere
(temperatura matriței 100 °C) [YU04]

Următorul pas pentru a îmbunătăți procesul de formare este de a crește temperatura de injecție. Figura 2.10 prezintă rezultatele simulării între temperatura matriței și adâncime-de-deschidere atunci când timpul de umplere este menținut constant la 1,5 s. Așa cum s-a văzut, creșterea temperaturii matriței nu ridică rapoartele de profunzime-la-deschidere dramatic, dacă temperatura matriței este scăzută sau doar un pic mai mare decât temperatura de tranziție vitrosă. Când temperatura matriței este la 200 °C, topitura de polimer poate umple cavitatea micromatriței complet în 1,5 s, așa cum se arată în rezultatele simulate [YU04].

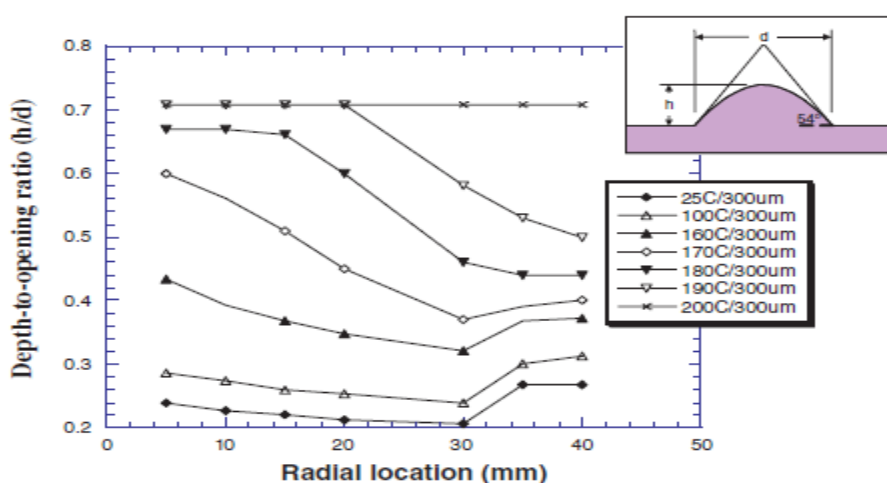


Figura 2.10 Rezultatele simulării cu diferite temperaturii ale matriței [YU04]

2.3.3. Rezultate experimentale [YU04]

Așa cum sa arătat anterior, unitatea de control a temperaturii sa dovedit a fi cea mai eficientă în obținerea de rezultate bune de formare. Prin urmare, un încălzitor capabil să mențină temperatura matriței a fost montat pe partea din spate a inserției pentru a controla temperatura. Figura 2.11 prezintă rezultatele probelor pentru încălzitorul stabilit la 100 °C. După cum se poate observa, microstructurile mari (cu deschideri mai mari de 100 μm) au suprafețe plate în loc de curbe, ceea ce înseamnă că topitura de polimer poate curge mai adânc în cavitatea micro-matriță și reproduce forma piramidală a cavității.

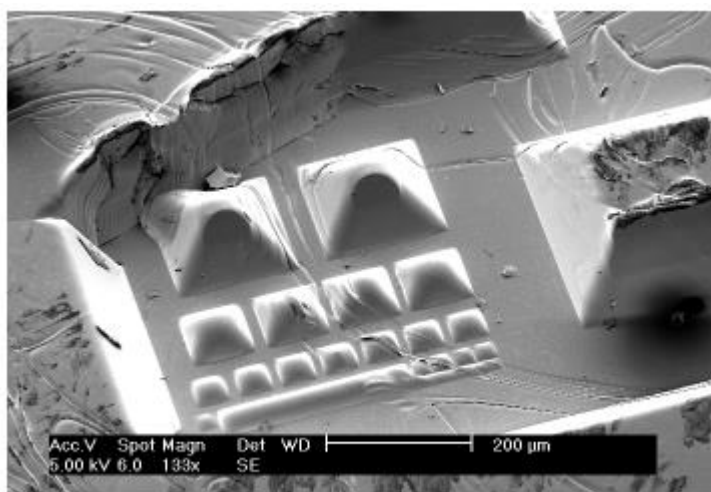


Figura 2.11 Fotografii efectuate cu microscop SEM la piesele produse. Presiunea de injectare 45 Mpa și temperatura matriței 100 °C [YU04]

Pe de altă parte, microstructurile mici (cu deschideri mai mici de 100 μm) au mai multe rezultate replicate în comparație cu rezultatele anterioare. Așa cum au prezis rezultatele de simulare, topitura de polimer nu poate umple complet micro-cavitățile. Din figura 2.10 rezultă că temperatura matriței ar trebui să fie mai mare de 200 °C pentru o umplere completă. Cu toate acestea, în această demonstrație, sistemul de încălzire utilizat este incapabil să mențină o astfel de temperatură ridicată. Prin urmare, una dintre viitoarele direcții de cercetare este de a avea un dispozitiv de încălzire și o matrice mai sofisticată pentru a obține o temperatură mai ridicată în matriță pentru rezultate optimizate. Pe de altă parte, dacă temperatura va crește, de asemenea va crește și perioada necesară de răcire. Un sistem de răcire poate să scadă temperatura eficient și să reducă timpul de răcire. O altă problemă este apariția de bule de aer în structurile de polimer injectate. În procesele de formare convenționale, fante de aerisire facilitează evadarea aerului din matriță în timpul umplerii acesteia. Cu toate acestea, fantele sunt aproape de mărimea microstructurilor astfel încât dacă

vor fi umplute prin procesul de micro-injectare ele nu vor reuși să elimine aerul prins. De aceea, un sistem de evacuare trebuie să fie construit și adaptat special pentru procesul de micro injectare.

2.3.4. Concluzii

O tehnică de matrițare prin injectare convențională pentru replicarea microstructurii polimerice a fost analizată. Conform simulărilor și rezultatelor experimentale, un proces de formare prin injecție convențională cu o strategie specifică de control de proces poate fi aplicat în fabricarea microstructurilor. Datorită raportului mare suprafață-volum al micro-cavității, temperatura topiturii de polimer scade rapid imediat după ce ajunge la intrarea cavității matriței. Dacă temperatura matriței este mai mică decât temperatura de tranziție ale polimerului, solidificarea rapidă va împiedica topitura să curgă în cavitate. Acest fenomen contribuie la raportul mic adâncime-deschidere în rezultatele preliminare de formare. Două modificări au fost efectuate pentru a îmbunătăți procesul. În primul rând, temperatura matriței trebuie să rămână mult mai mare decât temperatura de tranziție de polimer pentru a reduce viscozitatea în timpul etapei de umplere. În această situație, „topitura nu se solidifica în vecinătatea peretelui (stratul numit „piele”), iar timpul mai lung de umplere și presiunea de injecție inferioară poate fi folosită pentru a reduce tensiunile reziduale. În al doilea rând, *un vid este de preferat să fie folosit în micro-matriță pentru a evita posibilele capcane de aer*. În plus, parametri, *ca viteza de injectare, presiunea de injecție, timpul de răcire și temperatura topiturii trebuie să fie, de asemenea, controlate în mod corespunzător*, pentru a obține performanțe optime.

2.4. Strategii de implementare și simulare computerizată folosite pentru optimizarea procesului de injectare al pieselor miniaturale și cu pereți subțiri aplicate în vederea obținerii unei calități mai bune a produselor [TOS10]

Programele de simulare sunt aplicate în tehnologia de fabricație a pieselor miniaturale și cu pereți subțiri cu aceleași scopuri ca și în procesul prin injecție convențional. Pentru a evita riscurile de reproiectare costisitoare, erorile apărute la funcțiile produselor finale, precum și reducerea etapelor de producție, piesele sunt simulate pe larg înainte de a începe procesul de fabricare efectiv. Factorii economici mai importanți sunt optimizarea procesului de injectare și costul diferitelor scule necesare prelucrării.

Programele de simulare pot lucra în mod adecvat din punct de vedere calitativ, dar valorile numerice nu pot fi calculate foarte precis [PIO02]. În plus, cele mai multe programe

au dificultăți în simularea exactă a umplerii microstructuri în raport cu produsele de mărime convenționale. Motivul este că *instrumentele de software comerciale dezvoltate pentru aplicații macroscopice nu iau în considerare aspectele microscopice ale pieselor miniaturale*. Cu toate acestea, o strategie adecvată de implementare folosită în timpul pregătirii simulării poate îmbunătăți foarte mult calitatea rezultatelor simulate. În cursul acestor lucrări de cercetare, o bază vastă de date experimentale (bazat pe micro experimente reale de formare prin injecție) a fost stabilită în scopul de a efectua un studiu comparativ între rezultatele simulării și cele reale. Simulările au fost efectuate folosind un software disponibil comercial și punerea lor în aplicare a fost realizată aplicând abordări diferite. Rezultatele au fost comparate într-un studiu cantitativ pentru a indica metoda care conduce la rezultatele cele mai precise. În special, au fost selectați pentru analiză, indicatorii de performanță, cum ar fi presiunea de injecție, timpul de umplere a cavității matriței și punctul de injectare, pentru determinarea corectă a rezultatelor.

2.4.1. Validarea experimentală prin realizarea efectivă a pieselor miniaturale [TOS10].

Validarea software-ului de simulare este un pas esențial pentru a evalua capacitatea modelului matematic implementat pentru a prezice ceea ce se întâmplă, de fapt, în timpul procesului de injectare investigat. Pentru validarea fluxului de polimer (de exemplu, la umplere), pot fi utilizate diferite abordări: o micro cavitate umplută parțial în etape diferite (așa-numita metodă focuri scurte) [JAW03,WHY05,MEH03], metoda de vizualizare a curgerii în cavitate folosind o cameră video de mare viteză [HAN06], utilizarea markerilor de poziții pentru a urmări evoluția curgerii în timpul fluxului de umplere [TOS07,GAV07], compararea parametrilor de proces (de exemplu, presiunea de injecție). În cele din urmă o comparație poate fi realizată între simulare și rezultatele experimentale obținute.

Pentru a stabili o bază de date consistentă, care poate a fi utilizată pentru validarea rezultatelor obținute prin simulare, a fost creată o matriță experimentală de injectare cu cavități miniaturale care a fost montată pe o mașină de injectare Battenfeld Microsystem50. În corpul matriței, presiunea de injectare a fost măsurată cu ajutorul unui senzor de presiune piezoelectric aplicat în punctul de injectare acolo unde topitura este împinsă în cavitatea matriței de pistonul de injecție, unde se afla două micro cavități structurate. Măsurarea presiunii în timp a permis determinarea vitezei de injecție în cavitate și valoarea punctuală a presiunii în timpul umplerii matriței.

În figura 2.12 se pot observa: A) matriță cu elemente miniaturale încorporate și B) senzorul de presiune montat la punctul de injectare.

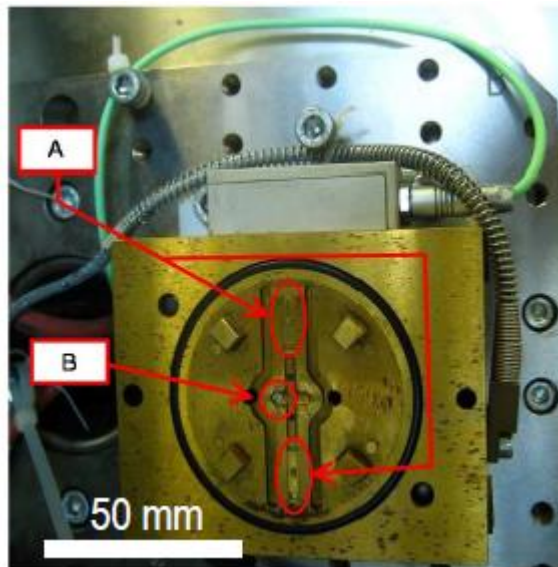


Figura 2.12 Matriță cu elemente miniaturale [TOS10]

Piesa produsă a fost o bară lungă de forma unei plăci subțiri ($15 \times 3 \times 0.3 \text{ mm}^3$) având inclusiv trei caracteristici miniaturale cu secțiune semicirculară (cu raza de $150 \text{ }\mu\text{m}$) și lungimi de la $1500 \text{ }\mu\text{m}$ până la $2000 \text{ }\mu\text{m}$ (vezi Fig. 2.13). Piesa a fost realizată cu ajutorul unui material polimeric disponibil comercial (PS). PS este un material relevant în domeniul realizării pieselor prin injecție, având o micro fluiditate ridicată și proprietăți optice foarte bune (transparență ridicată).

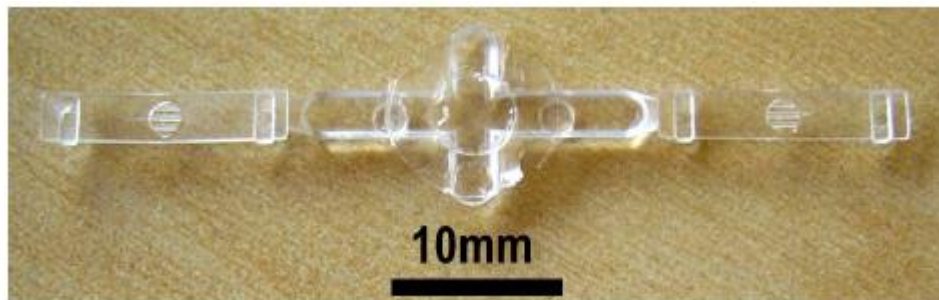


Figura 2.13. Piesă rezultată prin injecție [TOS10]

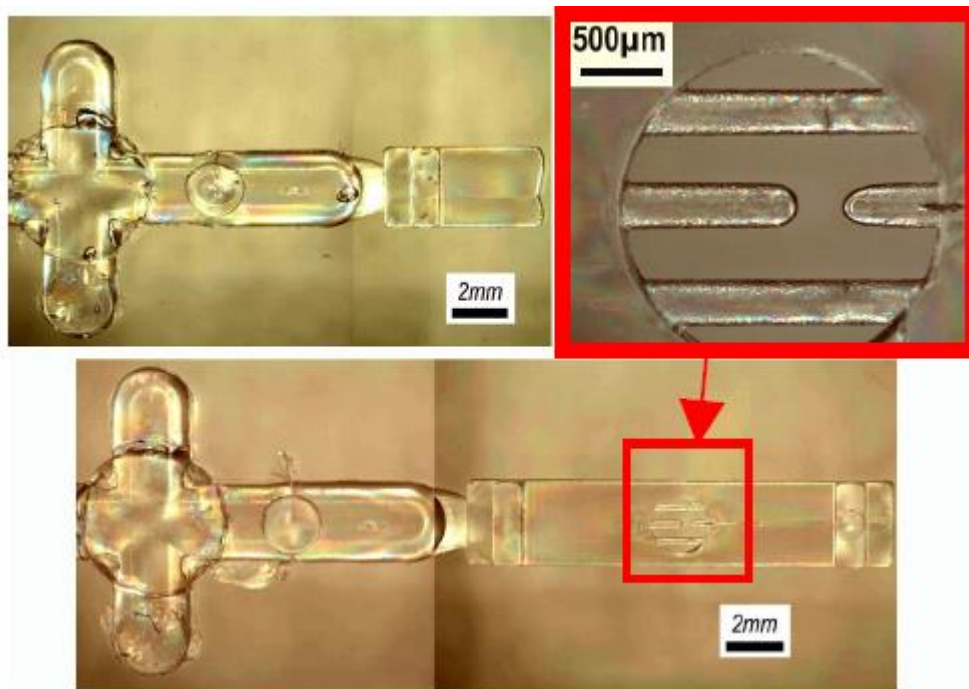


Figura 2.14 Exemplu al caracteristicilor miniaturale ale piesei [TOS10]

În timpul procesului de formare prin injecție, o execuție automată a procesului (inclusiv ejecție și manipulare automată a pieselor) a fost efectuată pentru fiecare lot. În prima etapă, 50 de cicluri au fost efectuate pentru a adapta și stabiliza procesul de injectare la parametri curenți de procesare. Ulterior, 10 piese obținute din următoarele 30 de cicluri au fost colectate și analizate în mod aleatoriu. Aceste părți, selectate aleatoriu, au fost măsurate și inspectate cu un microscop optic calibrat. În total s-au produs mai mult de 800 de piese injectate cu caracteristici miniaturale. Greutatea pieselor injectate din toate loturile au prezentat o deviație standard de 0,35 mg.

2.4.2. Validarea experimentală prin simularea cu ajutorul unui software a pieselor miniaturale [TOS10].

Software-ul comercial Moldflow Plastics Insight® MPI 6.1 a fost folosit pentru simulare. Principalele funcții ale materialelor implementate au fost Cross WLF (William Landel Ferry) pentru vâscozitate și Twodomain Tait pentru P_vt. S-au efectuat trei simulări tridimensionale de umplere iar setarea temperaturii topiturii a fost egală cu temperatura cilindrului iar temperatura matriței a fost egală cu temperatura dobândită de senzorul din matriță. Temperatura matriței a fost monitorizată cu un sistem de control în buclă închisă de către mașina de microinjectare.

Au fost investigate condițiile limită legate de piesă (modelare și de discretizare), precum și managementul dinamic al interferenței dintre mașină și fluxul de polimer / cavitate care sunt descrise în următoarele secțiuni:

2.4.2.1. Modelarea piesei [TOS10]

Când se simulează piese injectate de mărime macro convenționale, chiar dacă piesa are cavitatea modelată și a fost adăugat un mesh tridimensional, sistemul de injectare folosește, de obicei, un mesh unidimensional simplificat, în scopul de a economisi timpul de calcul. Acest lucru se datorează faptului că volumul sistemului de injectare este foarte mic în comparație cu volumul piesei, adică între 1 până la 5% și, se presupune că, în condiții de siguranță, nu va afecta rezultatele simulării finale.

În simularea micro injectării, după cum s-a menționat în secțiunea anterioară, sistemul de injectare poate contabiliza cu ușurință pentru mai mult de 50% din volumul de injecție. Istoria termo-mecanică a fluxului de topire este puternic influențată de evoluția dinamică a sistemului de injectare, punctul de injecție și în cele din urmă cavitatea. Prin urmare, o discretizare tridimensională completă a întregului sistem compus din rotor (figura 2.15A), cele două puncte de injecție (figura 2.14B) și cele două părți considerate ca o piesa completă a fost efectuată (figura 2.14C, 2.15D). Toleranța mesh-ului a fost de asemenea analizată și optimizată pentru a se potrivi nevoii de acuratețe specifice procesului micro injectării. În special, a fost adoptată o lungime medie a suprafeței de un singur element (de exemplu, tetraedru) de 90 μm . Mai mult decât atât, a fost utilizată o toleranță între modelul injectat și modelul CAD de 30 μm . Aceste setări au fost alese ca un compromis între precizia de modelare a piesei (care este necesară pentru modelarea micro caracteristicilor, vezi Figura 2.15E, 2.15F) și numărul rezultat de elemente pentru a reduce timpul de calcul. Modelul a avut un volum de 107 mm^3 și a fost modelat utilizând mai multe elemente tetraedre 3D solide.

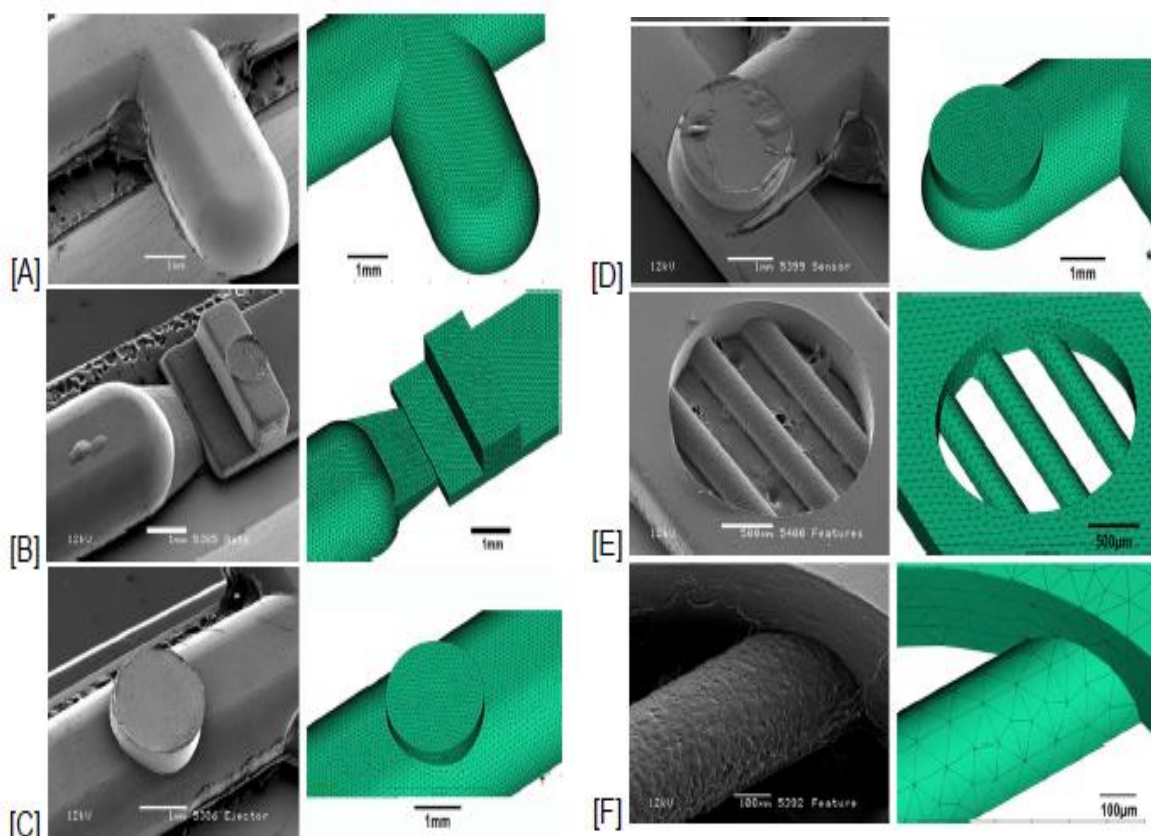


Figura 2.15 Comparație dintre imaginile obținute cu microscopul și modelul mesh-ului [TOS10]

2.4.2.2. Implementarea dependenței timpului de curgere [TOS10]

Atunci când se efectuează procesul de micro injectare, viteza de injectare (implementată ca viteza pistonului) este de obicei setată ca parametru pentru a defini evoluția în timp a topiturii care umple cavitatea. Diferite abordări pot fi utilizate pentru a crește precizia. Două metode au fost selectate și sunt prezentate în cele ce urmează.

- A. *timpul de injecție* - Din datele initiale, presiunea de injecție din cavitate (vezi figura 2.16), indicată de senzorul de presiune în timp real este determinată și pusă în aplicare în simulare. Software-ul va calcula fluxul de topitura, pentru a se potrivi constrângerilor de timp. În particular, i se va permite unui timp inițial de tranziție să ajungă la o valoare stabilă a debitului, pentru a simula întârzierea datorită accelerării pistonului. Pe de altă parte, atunci când se ajunge la o astfel de valoare, aceasta este menținută constantă în timpul injectării până la umplerea completă a matriței (condiția nu se verifică în realitate). A fost determinat și implementat un timp de injectare experimental de 83 ± 1 ms, timp în care se umple complet matrița.

B. *presiunea de injectare în matriță versus timpul de injectare*. Din rezultatul graficului presiunii de injectare în matriță (figura 2.16) dat de senzor, presiunea reală de injecție este redată și implementată în simulare. Pentru a obține o valoare experimentală a presiunii la locul de injectare, o viteză de curgere finită (de exemplu, viteza de injectare a pistonului) este necesară și este calculată de software. Prin urmare, este luată în considerare întârzierea datorită accelerării pistonului în simulare, precum și debitul efectiv și timpul necesar umplerii întregii cavități a matriței. De asemenea, starea fizică a polimerului (printr-o valoare punctuală a presiunii de injecție) este determinată. În experiment, repetabilitatea presiunii a fost calculată pentru fiecare valoare eșantionată prin timpul de injecție din toate cavitățile pentru trei piese alese în mod aleatoriu. A fost observată o deviație standard de 1,7 MPa.

Metoda (A) este efectuată utilizând o simulare de umplere efectuată prin controlul vitezei. Pe de altă parte, pentru a pune în aplicare metoda (B) este realizată o simulare de caz (de exemplu, controlul presiunii).

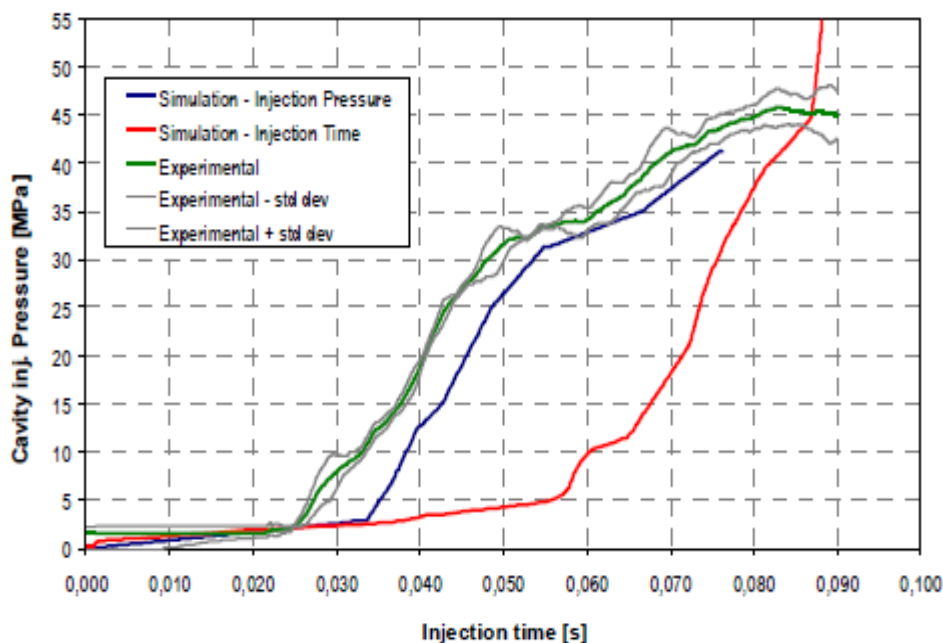


Figura 2.16 Comparație dintre rezultatele simulate și cele experimentale pentru metoda A și B. [TOS10]

Pentru a evalua acuratețea celor două metode de implementare, timpul de umplere parțial determinat împreună cu analiza experimentală a injecției rapide au fost comparate cu timpii parțiali prestabiliți (figura 2.17).

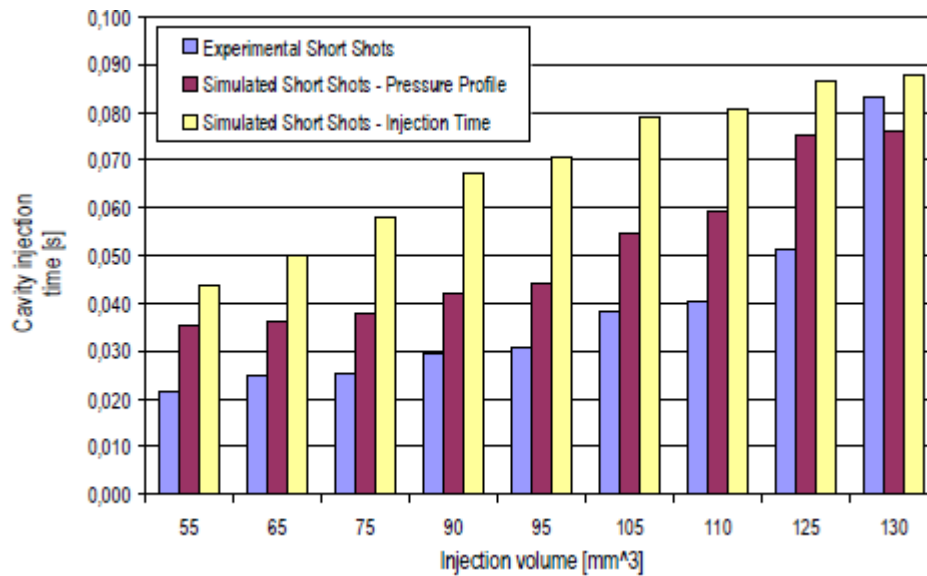


Figura 2.17 Rezultatele simulărilor [TOS10]

Simulările prezic clar o umplere mai lentă, chiar dacă într-o măsură diferită, în funcție de metoda adoptată. O implementare corectă a metodei (B) a condus la o reducere a erorii de calcul a timpului de umplere parțial. În special, în timp ce implementarea timpului de injecție (A) a produs o supraestimare a timpului de umplere parțială cu mai mult de 100%, implementarea profilului presiunii (B) a dus la o supraestimare cu mai puțin de 50%. Acest lucru înseamnă că starea dinamică a fluxului ar putea fi calculată cu precizie mai mare prin folosirea metodelor mai avansate. Modul de calcul al ratei de forfecare este mai precis și, prin urmare, valorile de vâkozitate ale materialului în timpul umplerii sunt determinate mai aproape de realitate.

2.4.3. Concluzii

Analizând această lucrare [TOS10] s-a ajuns la concluzia că simulările optimizate din procesul de micro injecție au potențialul de a permite încă din faza de concepție o mai bună cunoaștere a produsului final. Strategiile de implementare a simulării pot influența puternic rezultatele și trebuie să fie atent selectate. În special, a fost demonstrată importanța unei modelări precise și discretizării tridimensionale a sistemului de injecție. Mai mult decât atât, importanța datelor experimentale precise, cum ar fi presiunea de injecție în matriță, care urmează să fie puse în aplicare în software-ul de simulare. În special, precizia etapei de umplere ar putea fi îmbunătățită de cel puțin 50% în domeniul volumului de injecție / timpul de injecție. Folosind o strategie de punere în aplicare a profilului presiunii ar face ca simularea să aibă o precizie mai mare în comparație cu o primă abordare bazată numai pe timpul de umplere a matriței de injecție.

Ca rezultat final, se poate concluziona că utilizarea datelor experimentale reale din injectare poate îmbunătăți foarte mult calitatea simulării micro injectării. Datele nu trebuie să se limiteze la timpul efectiv de injectare și caracteristicile dinamice ale debitului (respectiv presiunea) care trebuie puse în aplicare.

2.5. Analiza experimentală a parametrilor ce influențează calitatea umplerii matrițelor pentru piese miniaturale și cu pereți subțiri [ATT 09]

În acest subcapitol se face o sinteză asupra parametrilor ce pot influența calitatea umplerii unei matrițe cu caracteristici de micro-injecție pentru fabricarea pieselor polimerice.

Cinci piese separate, cu diferite micro caracteristici sunt produse din polimetilmetacrilat. Abordarea printr-un experiment factorial este aplicată pentru a corela calitatea pieselor cu parametrii procesului de injectare. Parametrii de procesare sunt investigați folosind un plan factorial de experimentare pentru a determina efectul de influență care îl au asupra calității de umplere a pieselor injectate. Masa piesei este folosită ca un parametru de intrare pentru a reflecta calitatea umplerii produselor. Experimentele au arătat că presiunea este parametru de procesare cel mai semnificativ pentru diferite forme. În plus, experimentele au arătat că geometria pieselor joacă un rol în determinarea parametrilor semnificative de prelucrare. Pentru o piesă mult mai complexă, viteza de injectare și temperatura matriței a devenit un parametru statistic semnificativ. O abordare statistică a fost folosită cu succes pentru a îmbunătăți calitatea de umplere a fiecărei piese.

Micro-injectarea (μ IM) este un proces de fabricare polimeric cu potențial ridicat pentru producția în masă a unor piese polimerice miniaturale. Capacități de producție de masă, cu înaltă fidelitate de replicare și capacitatea de a procesa polimeri de o gamă largă de proprietăți sunt unele dintre avantajele asociate cu μ IM.

De ceva timp, principala abordare pentru a identifica parametrii de procesare care influențează micro injectarea a fost aceea de a schimba un parametru la un moment dat, păstrând restul parametrilor constanți și apoi observarea efectului asupra acestui parametru [Wim00, Yao02, DeM02]. Această abordare a fost moștenită de la procedeele de fabricație prin injecție a pieselor de mărime convențională, și a fost utilă în a trage concluzii de bază cu privire la modul în care fiecare parametru afectează calitatea de umplere a părții injectate.

Această abordare, are două limitări principale [Eri08]. Prima limitare este faptul că ea consumă mult timp când trebuie să se cerceteze mai mulți parametri. Al doilea dezavantaj este că nu ia în considerare efectul interacțiunii dintre doi sau mai mulți parametri, care constituie un criteriu relevant în procesele complexe cum ar fi microinjectarea.

Abordarea prin experimente factoriale a fost introdusă în acest domeniu de cercetare ca o alternativă utilă la această metodă convențională. O serie de grupuri de cercetători au utilizat o varietate de planuri experimentale pentru a investiga relația dintre parametrii de procesare și calitatea umplere a pieselor [ZHA03].

Rezultatele prezentate în literatura de specialitate arată că din diferitele modele de de experimente factoriale aplicate, fiecare dau rezultate diferite. De exemplu, există un dezacord cu privire la importanța dintre presiune și viteza de injectare. Mai mult decât atât, unele experimente au evidențiat interacțiuni între parametri de prelucrare care nu au fost observate în alte lucrări. Aceste diferențe dintre rezultatele experimentale se pot datora diferitelor forme geometrice, polimeri folosiți și instalațiile experimentale utilizate în fiecare experiment. Ar fi, prin urmare, rezonabil să susținem că, în prezent, parametri semnificativi de prelucrare din μ IM sunt identificați de la caz la caz și nu pot fi generalizate pentru toate situațiile.

Experimentul prezentat se referă la efectul parametrilor de prelucrare cu privire la calitatea de umplere a pieselor micro injectate printr-o abordare de experiment factorial.

În acest experiment, cinci piese (a până la e) cu caracteristici de micro-injectare au fost cercetate. Piesele, care sunt componente ale unui dispozitiv microfluidic, au fost concepute pentru a avea aceleași dimensiuni exterioare, dar cu diferite seturi de caracteristici, atât pe suprafața, cât și în componenta. Diferite definiții ale microinjectării sunt în literatură [ATT09], scopul în acest experiment a fost de a folosi componente "macro" cu regiuni microstructurate [ATT 09].

Polimerul ales pentru acest studiu a fost polimetilmetacrilat (PMMA) (VS-UVT, Altuglas ®). Acesta a fost selectat pentru ușurința curgerii (MFI = 24 g/10 min) și transparența optică (de transmisie a luminii de 92%). Mașina de injectat pentru micro-injecție a fost un Battenfeld Microsystems 50 [ATT 09].

Cinci parametri de prelucrare au fost investigați ca factori de intrare:

- temperatura de topire a polimerului (T_p),
- temperatura matriței (T_m),
- viteza de injectare (V_i),
- presiunea de injectare (P_h)
- timpul de răcire (t_c).

Răspunsul (parametru de calitate) în toate experimentele a fost masa pieselor (W).

Cele cinci piese injectate utilizate în acestă cercetare au fost toate în formă de disc, cu un diametru de 10 mm și o grosime de 1 mm. Piesele au fost concepute pentru a fi folosite la construirea unor elemente dintr-un dispozitiv microfluidic pentru o aplicație medicală. Fiecare

dintre cele cinci componente are un set diferit de micro caracteristici. Figura 2.18 se prezintă o jumătate de secțiune transversală schematică a celor cinci modele in parte (notate cu a pana la e), cu unele din dimensiunile lor critice:

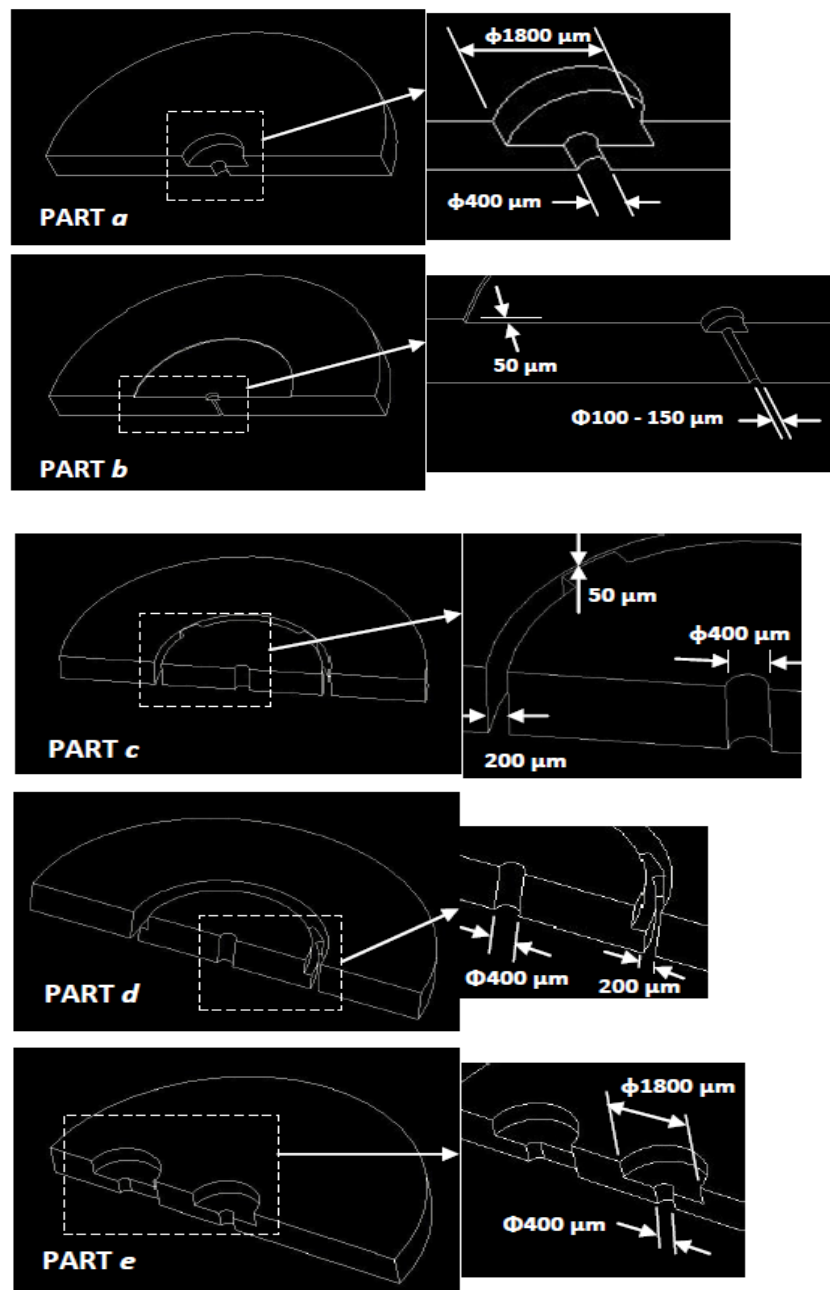


Figura 2.18 Micro inserțiile din matriță [ATT 09]

Fiecare piesa a fost modelată într-o matriță formată dintr-un bloc individual de aluminiu care a fost găzduit într-un corp principal de micro-injecție produs din oțel [MAR 09]. În figura 2.19 se prezintă o imagine a micro inserțiilor din matriță.

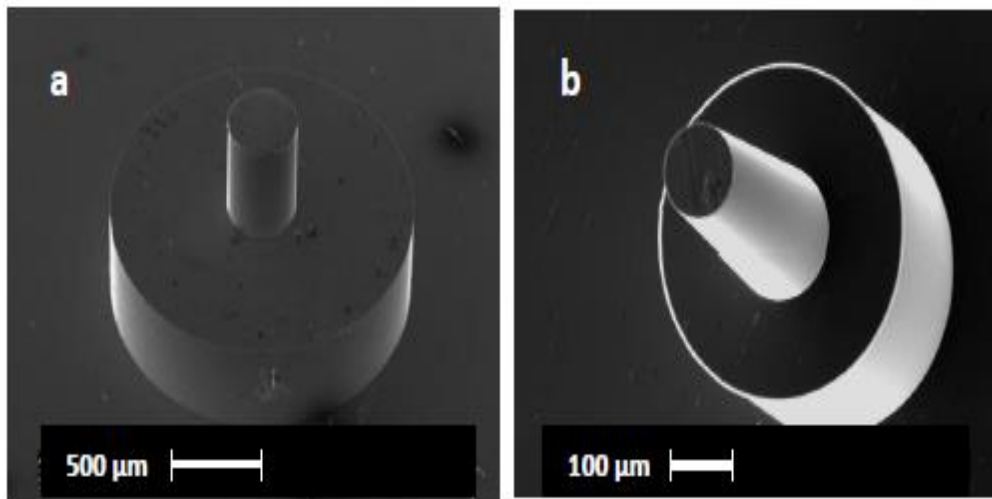


Figura 2.19 [ATT 09]

În etapa de familiarizare, un set de experimente au fost efectuate, în care parametrii de intrare au fost selectați și evaluați pentru a determina nivelele extreme la care experimentul a dat cu succes un răspuns. Această etapă din procesarea parametrilor a fost folosită pentru a depista nivelurile de minim și maxim ale parametrilor de intrare utilizate în experimente. Volumele de măsurare ale pieselor au fost determinate experimental. Volumul fiecărei piese a fost aleasă astfel încât cantitatea de polimer este suficientă pentru a umple spațiul cavității matriței. Gama de eșantionare a fost de asemenea determinată prin numărul de cicluri de injecție, după care procesul este considerat a devenit stabil. Stabilitatea a fost definită ca fiind realizată atunci când fiecare dintre piesele injectate posedă aceeași masă, într-o anumită toleranță [ATT 09].

Tabelul 2.1 prezintă criteriile utilizate pentru selectarea valorilor superioare și inferioare pentru fiecare parametru.

Tabelul 2.2 prezintă nivelurile superioare și inferioare de parametri selectați pentru fiecare dintre cele cinci piese împreună cu volumul de injecție selectat pentru fiecare în parte (inclusiv sistemul aruncător).

Tabel 2.1 [ATT09]

Factor de influență	Criteriu de selecție	
	Limita superioară	Limita inferioară
T_p [°C] Temperatura piesei	Valoarea minimă pentru acest nivel a fost recomandat de furnizorul de material (în jur de 200 ° C). Pe baza experimentelor, au fost selectate temperaturi relativ ridicate, astfel încât procesul de injectare a rulat continuu.	Această limită a fost selectată experimental ca o limită de siguranță, peste care au apărut semne de degradare la piesa.
T_m [°C] Temperatura matriței	Temperatura minimă a fost selectata ca temperatura recomandată de către furnizorul de material	Nivelul ridicat a fost selectat aproape, dar mai jos, de temperatura maximă de injectare a polimerului
P_h [bar] Presiunea de injectare	Valoarea minimă a presiunii de injectare a fost obținută din literatura de specialitate (Osswald 2001)	Valoarea maximă a presiunii de injectare a fost limita producerii unor disturgeri asupra materialului
V_i [mm] Viteza de injectare	Această valoare a fost determinată experimental	Această valoare a fost selectată experimental
T_c [s] Timpul de răcire	Valoarea minimă a fost calculată ca fiind timpul fără curgere.	Maximum a fost dublu valorii de minim

Tabelul 2.2 [ATT09]

Pi es a	Volumul de măsurare [mm]	T_p [C]		T_m [C]		V_i [mm/s]		P_h [bar]		T_c [s]	
		Nivel minim (-)	Nivel maxim (+)	Nivel minim (-)	Nivel maxim (+)	Nivel minim (-)	Nivel maxim (+)	Nivel minim (-)	Nivel maxim (+)	Nivel mini m (-)	Nivel maxi m (+)
a	179	240	255	70	81	200	300	250	500	4	7
b	178	230	250	72	80	150	300	100	300	4	7
c	177	230	250	72	84	150	300	100	300	3	6
d	177	230	250	72	84	150	300	100	300	3	6
e	177	230	250	73	84	150	300	100	300	3	6

În etapa de depistare s-au executat de set de experimente. Numărul de probe și nivelul variabilelor de intrare au fost obținute din stadiul de familiarizare. Programe software și modele de regresie statistică au fost utilizate pentru a analiza datele. S-au determinat parametri semnificativi de procesare și interacțiunile între acestea. Din acestea a rezultat un experiment factorial, pe doua niveluri, cu 16 parametri (2^{5-1}).

Nivelurile experimentale sunt prezentate în tabelul 2.3 pentru fiecare set de experimente, ordinea în care au fost efectuate experimentele a fost aleatoare utilizând o funcție specifică încorporată în programul Minitab.

Tabel 2.3 [ATT09]

Nr. Crt	T_p [C]	T_m [C]	P_h [mm/s]	V_i [bar]	t_c [s]
1	-	-	-	-	+
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	+
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	+
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	+
11	-	+	-	+	+
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	+
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	-	+	+

După stabilizare, zece piese au fost colectate la întâmplare pentru fiecare încercare. Imaginile cu piesele rezultate sunt prezentate în figura 2.20. Masa medie a probelor a fost înregistrată ca răspuns al experimentului. Datele experimentale colectate au fost prelucrate cu programul Minitab® 15 și principalele diagrame de efect și Pareto au fost reprezentate grafic (figura 2.20).

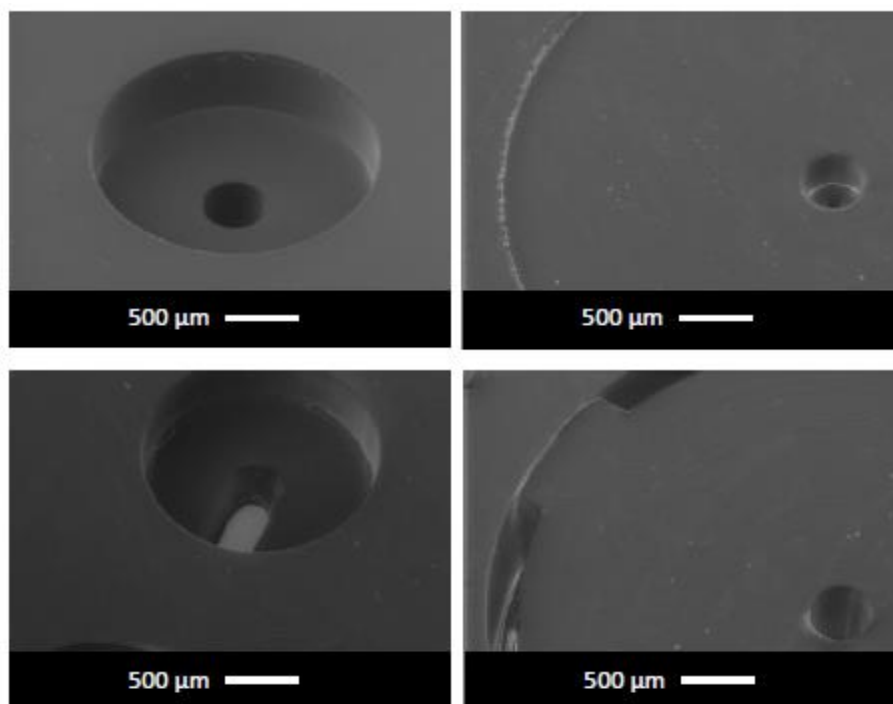


Figura 2.20 Imagini cu piesele rezultate [ATT09]

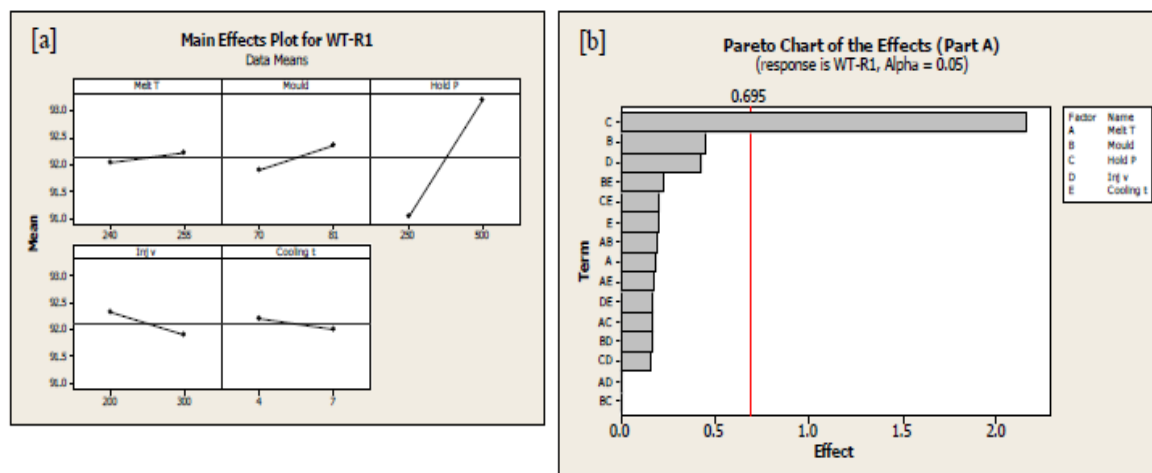


Figura 2.21 Reprezentarea grafică a rezultatelor [ATT09]

O tehnică de corelare a factorilor de răspuns este de a folosi modele de regresie. Similar cu modele de regresie convenționale folosite pentru a corela două variabile, un model de regresie poate fi utilizat pentru a obține răspunsurile la factorii de intrare. Modelul poate fi liniar, pătrat sau chiar cubic, în funcție de numărul de experimente efectuate (Eriksson et al. 2008). În acest experiment, un model special de interacțiune a fost selectat deoarece ia în considerare efectul de posibilelor interacțiuni cu privire la valoarea de răspuns. Modelul de regresie selectat are următorul format:

$$Y = C_1 + \beta_1 X_1 + C_2 + \beta_2 X_2 + \dots + C_n + \beta_n X_n \quad (1)$$

În ecuația (1):

- y este răspunsul,
- c este constanta,
- β sunt coeficienții termenului model,
- x1 la x5 sunt factori.

Valorile și semnele coeficienților de regresie, β , reprezintă amploarea și relația dintre fiecare termen de model, respectiv. Odată coeficienții ecuației (1) determinați ca răspuns a unui ansamblu de factori dați poate fi calculat.

Precizia piesei fost evaluată prin compararea valorilor de răspunsuri calculate din model, pe baza coeficienților obținuți, cu valorile experimentale reale obținute.

Rezultatele experimentale obținute arată că un efect semnificativ în procesul de injecție este menținerea presiunii de injectare egală pentru toate cele cinci piese. Menținând presiunea de injectare constantă au rezultat patru piese (b, c, d și e) cu o umplere perfectă și o

piesa rebut (a), figura 2.22. Acest efect substanțial a fost, de asemenea, vizibil în timpul experimentelor, toate piesele care au fost produse la un nivel mai scăzut al presiunii de injectare au avut semne de umplere incompletă, indiferent de nivelul celorlalți patru parametri. În contrast, timpul de răcire a avut nici un efect pentru oricare dintre piese.

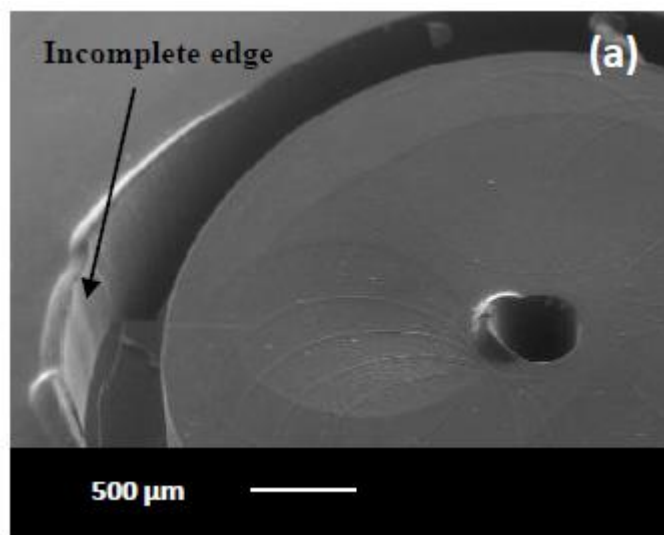


Figura 2.22 Exemplu de umplere incompletă [ATT09]

Pentru piesa a, s-au observat trei efecte semnificative: presiune de injecție, viteza de injecție și temperatura matriței. Cu toate acestea, în afară de piesa a, temperatura matriței și viteza de injecție nu a avut nici un efect evident asupra masei altor piese.

Importanța presiunii de injecție constă în faptul că ea învinge tendința topirii de polimer de solidificare prematură înainte de finalizarea procesului de injecție. Solidificarea prematură este probabil să fie exacerbată de rata relativ mare de transfer de căldură între polimer și pereții matriței pentru piese miniaturale.

Rezultatele experimentale au arătat că la valorile optime de injecție, toate cele cinci piese au ieșit în parametrii. Aceste valori sunt prezentate în tabelul:

Tabelul 2.4. Parametrii de procesare optimi [ATT09].

Parametru	T_p [C]	T_m [C]	P_h [mm/s]	V_i [bar]	t_c [s]
Valoare	250	84	200	300	3

Produsul final este prezentat în figura 2.23, în care toate piesele au fost studiate la microscop pentru a verifica dacă umplerea a fost completă.

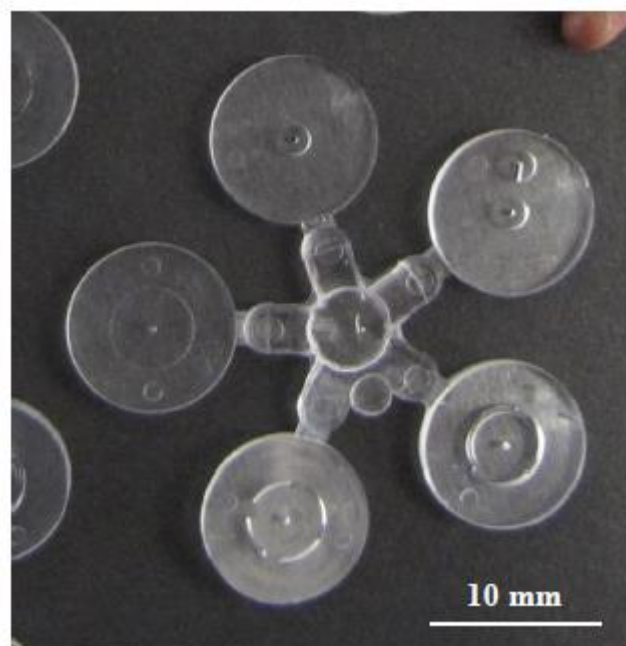


Figura 2.23 Piesă completă produsă în condițiile optime [ATT09]

Pentru a investiga efectul asupra geometriei pieselor a parametrilor de injectare, această lucrare a investigat parametrii de injectare a cinci micro-piese diferite, folosind masa ca un răspuns al experimentului. Piesele produse au fost diferite la punctul de injectare și la geometria de suprafață, dar au avut o rază exterioară constantă și grosimi similare. Același polimer, PMMA, a fost utilizat în toate experimentele. A fost folosit un model de experiment factorial cu trei etape de abordare, constând în: fezabilitate, depistare și funcția de dezirabilitate pentru a evalua calitatea de umplere în micro matrițe de injectare și pentru a corela la parametrii de procesare. A fost demonstrat că presiunea de injectare este principalul parametru de procesare care a influențat toate geometriile pieselor.

O comparație a parametrilor de injectare optimi pentru diferitele geometrii a pieselor, au arătat influența geometriei în condițiile de procesare. Modificări evidente de grosime din cadrul pieselor au fost corelate cu o creștere semnificativă a numărului de parametri. Pentru o piesă complexă, viteza de injectare și temperatura matriței au devenit, din punct de vedere statistic mai importante.

Pentru fiecare piesă, o funcție de optimizare fost folosită pentru a descoperi o combinație de condiții de prelucrare care ar îmbunătăți calitatea de umplere. Piesele produse au avut masele medii în limita de 0,5% din valorile țintă.

2.5.1. Concluzii

Analizând această lucrare [ATT09] s-a ajuns la concluzia că abordarea prin experimente factoriale este un mod obiectiv pentru proiectarea și realizarea unui experiment factorial în care parametrii de injectare sunt investigați pentru a determina efectul de influență care îl au asupra calității de umplere a pieselor miniaturale obținute prin injectare.

Folosirea experimentului factorial prezintă o serie de avantaje în raport cu experimentele care dezvoltă un singur factor la un moment dat. Mai mult, un experiment factorial este recomandat atunci când este suspectă existența interacțiunilor pentru a nu concluziona greșit influența factorilor principali. Experimentul factorial cu 2-niveluri (tip 2^k) este experimentul la care fiecare factor (din cei k factori) are 2 niveluri de variație: inferior și superior. Intervalul de variație al unui factor de influență este supus unei restricții naturale, care determină limitele sale (inferioară și superioară). Experimentul factorial include toate combinațiile nivelurilor factorilor, indică tendințele majore, deci se poate utiliza pentru determinarea direcției de dezvoltare a experimentelor viitoare.

Rezultatele obținute sunt prelucrate matematic folosind analiza dispersională, numită și analiza varianței (ANOVA), metoda statistică de analiză a datelor de măsurare. Rezultând valori obținute experimental ale unor funcții obiectiv ce depind de unul sau mai mulți factori de influență cu acțiune simultană, cu scopul de a stabili semnificația acestor factori asupra funcției obiectiv analizate.

Capitolul 3

Obiectivele 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 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 activări ultrasonice a proceselor precum injectarea pieselor cu pereți subțiri și microinjectarea. 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 ultrasonic 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 1996-2014 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])
- Proiectul de cercetare și dezvoltare NANO INTELLIFORM , desfășurat în perioada 2012-2013 și cofinanțat de Comunitatea Europeană, asupra aplicării energiei ultrasonice în procedeele de micro injectare.
- Proiectul 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 (2000-2014) 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 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].
- Cercetarea teoretică și experimentală a efectelor activării cu ultrasunete în procesele de micro injectare a materialelor polimerice folosind matrițe miniaturale, efectuate în perioada 2008 -2012 la la Universitatea Politehnica Timișoara în cadrul unei teze de doctorat cu titlul: „Studiul activării ultrasonice a proceselor de curgere a materialelor polimerice termoplastice cu aplicare la procedeele de microinjectare și injectare a pieselor cu pereți subțiri” [SER12].

Temele enunțate anterior 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 perețele 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 parametrii ce influențează activarea ultrasonică aplicată pentru realizarea pieselor cu pereți subțiri.

În condițiile menționate anterior, obiectivul tezei poate fi formulat de o manieră sintetică ca fiind cercetarea teoretică și experimentală pentru îmbunătățirea calității pieselor miniaturale sau cu pereți subțiri obținute prin injectare activată ultrasonic.

Pentru îndeplinirea acestui obiectiv se au în vedere folosirea unor ansambluri ultrasonice formate dintr-o matriță experimentală și mașină de injectat materiale polimerice 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;
- 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 experimentale obținute și propunerea unor noi soluții constructive care să eficientizeze metoda.

Capitolul 4

Studiul unui model experimental pentru identificarea parametrilor de influență la injectarea ultrasonică a pieselor miniaturale sau cu pereți subțiri

Scopul studiului experimental este de a verifica influența activării ultrasonice asupra comportamentului reologic al topiturii de polimer, ca factor cu efect independent sau coroborat cu mai multi factori de influență.

Pentru acest lucru se iau în considerare următoarele aspecte :

- comportamentul reologic al topiturii de polimer în spațiile de dimensiuni reduse ale matriței;
- efectele temperaturii și presiunii de injectare;
- interștiul piesei prin configurația piesei și a cavităților matriței;
- activarea ultrasonică a procesului de injectare.

4.1. Comportamentul reologic al topiturilor de polimer în spații de dimensiuni reduse ale matriței.

4.1.1. Vâscozitatea topiturii de polimer

Vâscozitatea de forfecare este o caracteristica fizică a topiturilor de polimer și reprezintă rezistență la forfecare a materialului supus unei solicitări mecanice care îi determină deplasarea printr-o secțiune liberă de curgere.

Vâscozitatea este exprimată prin raportul dintre tensiunea de forfecare (forța/unitatea de suprafață) la viteza de forfecare (rata de schimbarea a tensiunii de forfecare), așa cum se arată în ecuațiile de mai jos, cu notații conform Figurii 4.1:

$$\text{Vâscozitate} = \frac{\text{tensiune de forfecare}}{\text{viteza de forfecare}}$$

unde

$$\text{tensiunea de forfecare} = \frac{\text{forța, (F)}}{\text{secțiunea de distribuție a forței, (A)}}$$

$$\text{viteza de forfecare} = \frac{\text{viteză, (v)}}{\text{lățimea secțiunii considerate, (h)}} = \frac{d v}{d x}$$

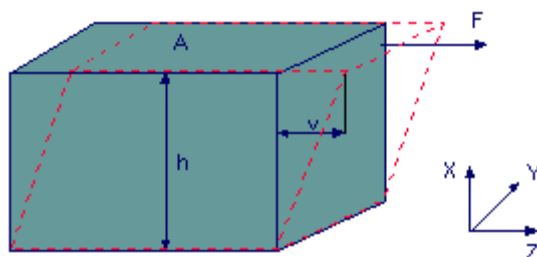


Figura 4.1. Model grafic pentru definirea vâscozității topiturii de polimer la curgerea cu forfecare simplă [STA06]

4.1.2. Fluid newtonian. Fluid non-newtonian

Pentru fluide newtoniene, vâscozitatea este o funcție constantă în raport cu temperatura, indiferent de viteza de forfecare. Un exemplu tipic de fluid Newtonian este apa. Pentru acest fluid, în curgerea laminară (fără turbulențe) se consideră că nu există variație a vitezei de deplasare în secțiunea de curgere.

Pentru fluide non-newtoniene, categorie în care sunt incluse și topiturile de polimer, vâscozitatea variază în mod direct, nu numai cu temperatura, dar și cu viteza de forfecare. Funcția de variație a vâscozității nu mai este liniară (Figura 4.2), cu evoluție mai mult sau mai puțin abruptă.

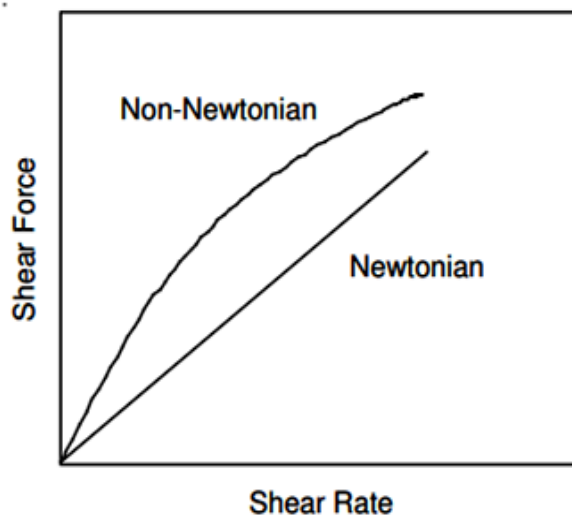


Figura 4.2 Variația vâscozității pentru fluide newtoniene și non-newtoniene [LON09]

4.1.3. Reducerea rezistenței la forfecare

În general, topitura de polimer are o vâscozitate ridicată datorită structurii volumice particulare, dată de macromoleculele întrepătrunse care opun rezistență la alunecare unele pe altele. Vâscozitatea polimerului topit variază de la 2 la 3000 Pa·s (vâscozitate apă = 10^{-1} Pa·s, vâscozitate sticlă = 10^{20} Pa·s).

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m/s}} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \text{Pascal} \cdot \text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

Când polimerul este supus unei solicitări mecanice, vor exista unele despachetări ale macromoleculelor întrepătrunse, deplasări relative (alunecări) favorizate de alinierea acestora pe direcția de deplasare. Această evoluție a microstructurii volumice, adică tendința de aliniere în direcția de curgere, determină scăderea vitezei relative a volumelor elementare învecinate și rezistența la curgere va fi mai mică. Acest fenomen, specific curgerii lichidelor cu vâscozitate mare (rezistență la curgere și viteză mare de forfecare), este menționat adesea ca "reducere a rezistenței la forfecare", indusă de dinamica structurii volumice.

Acest comportament oferă posibilitatea unor aplicații interesante pentru topiturile de polimer. Inițierea curgerii și facilitarea deplasării topiturii determină alinierea macromoleculelor pe direcția curgerii, scade viteza de forfecare și crește viteza de deplasare și debitul transferat.

Pentru o topitura de polimer, dacă presiunea care determina curgerea este dublata, în baza fenomenului descris anterior, rata de curgere a topiturii (și debitul transferat) poate crește între 2 și 12 de ori, în funcție de material.

Conform rezultatelor experimentale, activarea ultrasonică poate influența comportamentul topiturii de polimer în vecinătatea peretelui canalului de curgere (sau peretele cuibului).

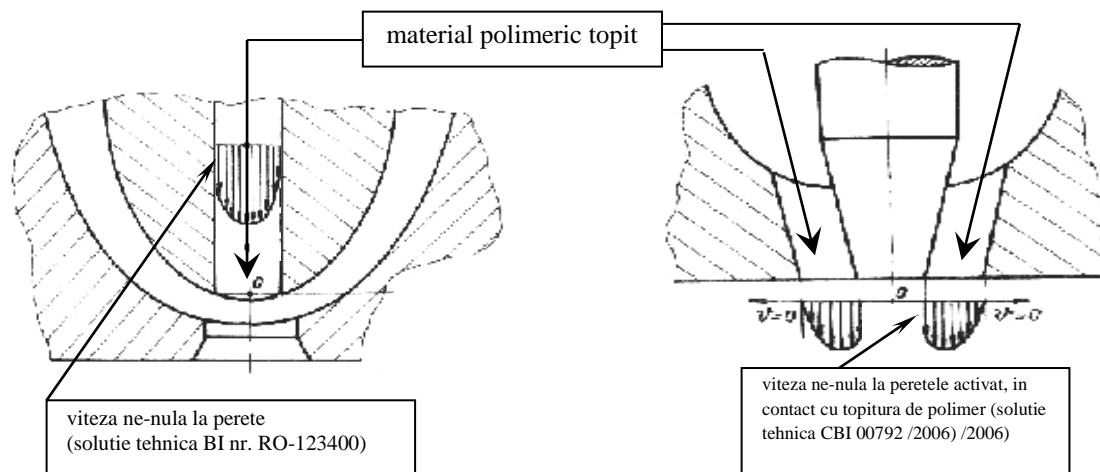


Figura 4.3. Distribuția ipotetică a vitezelor de curgere în secțiunea liberă

Este de așteptat manifestarea unui *efect de suprafață* (pe suprafața de contact topitură-element activat ultrasonic), de alunecare la perete, care determină modificarea distribuției de viteză în secțiunea de curgere (Figura 4.3) și a unui *efect termic* (transformarea energiei mecanice a oscilației ultrasonice în energie termică) pe suprafața exterioară a concentratorului mai ales în zonele vecine unui centru de oscilație și fluidizarea materialului polimeric din vecinătatea peretelui activat ultrasonic: suprafața acului centrat în duza activată (cuib 1) sau suprafața poansonului activat (cuib 2) conform soluțiilor constructive pentru matrița experimentală.

Efectul de suprafață manifestat la activarea ultrasonică a unui cuib spiralat (spirală Grifitt, microinjectare) a fost verificat în experimente anterioare, Anexa 1, iar efectul termopelicular, ca suprapunere a efectului de suprafață cu efectul termic (induse de activarea ultrasonică) a fost constatat în încercări experimentale de extrudare cu activare ultrasonică efectuate pe un dispozitiv cu configurație similară duzei activate ultrasonic (Anexa 2).

4.1.4. Distribuția vitezei de forfecare în secțiunea de curgere

Figura 4.4a prezintă distribuția teoretică a vitezei de forfecare în secțiunea liberă de curgere (de ex: prin secțiunea canalului de distribuție din matrita de injecție). În principiu, cu cât volumele elementare de material trec mai repede unele peste celelalte, cu atât rata de forfecare este mai mare. Rata de forfecare este o măsură a vitezei relative dintre doua volume elementare învecinate, în mișcare.

De aceea, pentru un profil tipic vitezei de curgere a topiturii și ipoteza clasică de viteză nulă la perete (Figura 4.4a) este evident că viteza de forfecare este maximă în vecinătatea

peretelui (interfața metal-topitură) și se apropie de valoarea zero în vecinătatea liniei de centru unde nu există mișcare relativă între volume elementare (Figura 4.4b).

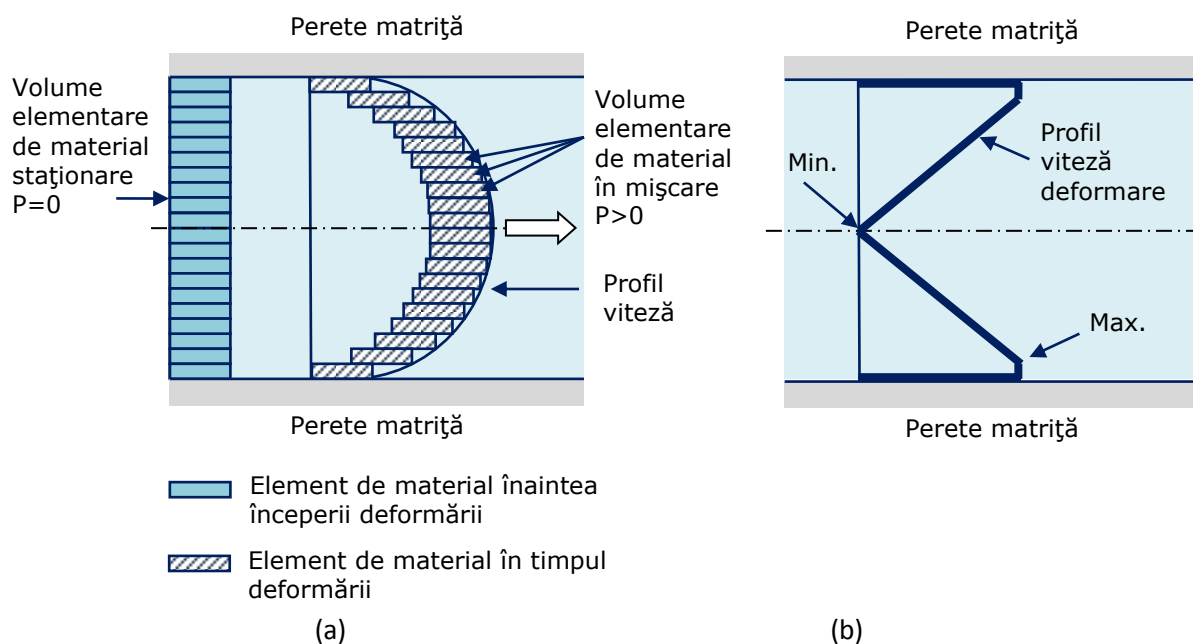


Figura 4.4. Distribuție teoretică a vitezei de deplasare a volumelor elementare de material polimeric topit în secțiunea liberă de curgere prin matrița de injectare [STA99]

La injectare, viteza de forfecare este un factor de influență deoarece determină în mod direct vâscozitatea topiturii, așa cum s-a arătat anterior, dar are și un efect indirect, prin influența asupra cantității de căldură dezvoltată prin frecare internă, între macromolecule. Acest fenomen, de frecare internă, poate conduce la supraîncalzirea locală a topiturii și degradarea materialului (Figura 4.5).

Pentru evitarea suprapunerii efectului termic al activării ultrasonice cu efectul termic generat de frecarea internă considerăm că, în programul experimental, viteza de injectare trebuie să rămână constantă, la o valoare stabilită experimental care să nu afecteze termic materialul transferat prin zona activată ultrasonic (Figura 4.5).

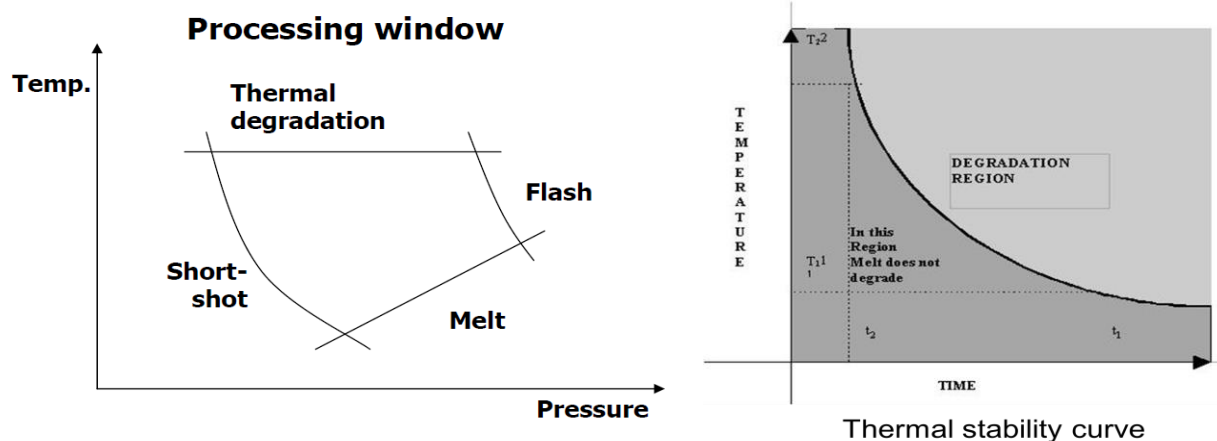


Figura 4.5 Stabilitatea termică a topiturii de polimer [MOA01]

Orientativ, valorile vitezei de forfecare pentru topituri de polimer variază între 10^2 și 10^5 s^{-1} .

Exemplu: pentru PEID extrudată printr-o capilară cu diametrul $D = 3,2 \text{ mm}$ și lungimea $L = 38,4 \text{ mm}$ s-a obținut $\Delta p = 8,4 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, ..., iar valorile efortului de forfecare, vâscozității și vitezei de curgere sunt prezentate în Tabelul 4.1 [www.eplastics.com] :

Tabel 4.1

Nr. crt.	$r \cdot 10^3$, [mm]	$\tau_{rz} \cdot 10^{-4}$, [N m^{-2}]	$\eta \cdot 10^{-4}$, [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	v_z , [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
1	0	0	∞	1.030
2	0.2	2.188	31.0	1.029
3	0.4	4.376	8.809	1.025
4	0.6	6.564	4.216	1.006
5	0.8	8.752	2.5	0.957
6	1.0	10.94	1.67	0.859
7	1.2	13.128	1.197	0.686
8	1.4	15.316	0.904	0.411

4.1.5. Parametrii de influență asupra comportamentului reologic a topiturii de polimer

Pentru materiale polimerice topite, modelele teoretice de curgere au la bază distribuția parabolică a vitezei în secțiunea liberă, transversală, de curgere, influențată în mod evident de către valoarea temperaturii (Figura 4.6).

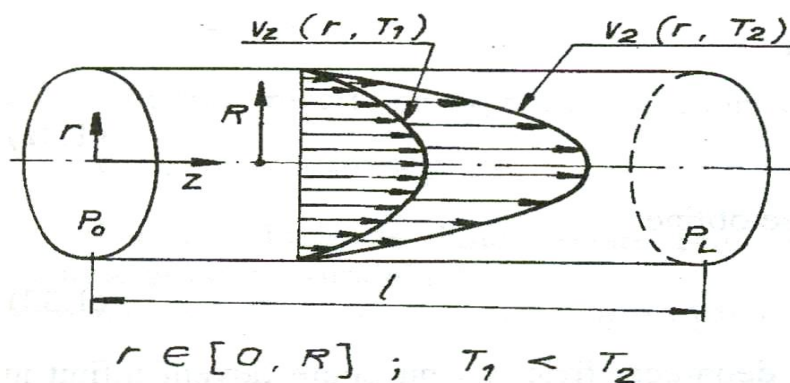


Figura 4.6. Influența temperaturii asupra distribuției vitezei de deplasare a topiturii în secțiunea liberă, transversală, de curgere. [ICL06]

La valori ridicate de temperatură se constată creșterea debitului de material transferat prin secțiunea liberă de curgere (integrala curbei de variație a vitezei, pe secțiunea transversală a canalului de curgere) fapt ce se explică prin modificarea profilului de curgere.

Mai mult, experimental s-a demonstrat că nu numai temperatura de procesare dar și rugozitatea suprafeței peretelui canalului de curgere (Figura 4.7), influențează comportamentul reologic al materialului topit în vecinătatea peretelui, profunzimea stratului de material afectat fiind în funcție și de acest parametru.

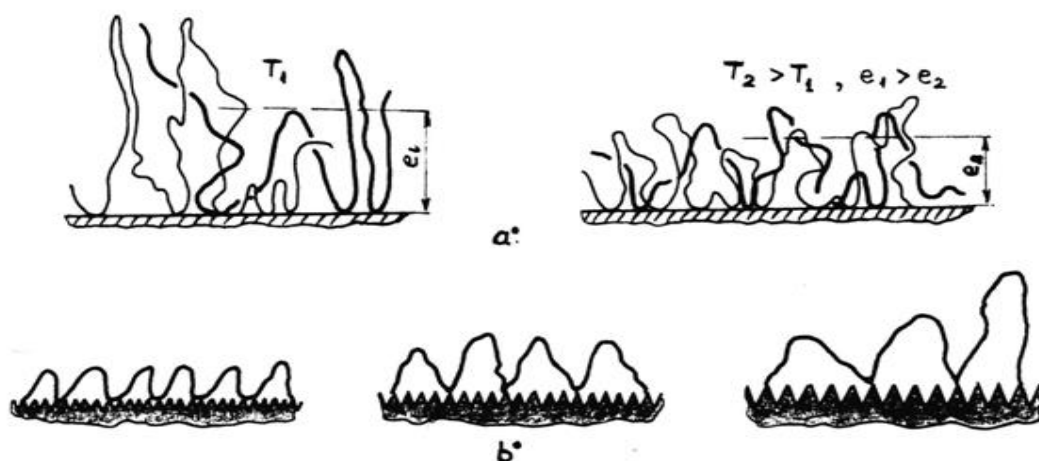


Fig.4.7 Variația numărului de contacte macromoleculă-perete. Relația între grosime stratului afectat de vecinătatea peretelui, temperatură și rugozitate, [BEN 03]

4.2. Efectele temperaturii și presiunii asupra topiturii de polimer

Deoarece mobilitatea lanțurilor moleculare polimerice scade odată cu scăderea temperaturii, rezistența la curgere a polimerului topit depinde în mare măsură de temperatură. Așa cum se arată în Figura 4.8, vâscozitatea topiturii scade odată cu creșterea

vitezei de forfecare datorate desfacerii și alinierii moleculelor iar mobilitatea moleculelor de polimer este tot mai mare pe măsura creșterii temperaturii. În plus, vâscozitatea topiturii mai depinde și de presiunea aplicată pentru transferul topiturii. Cu cât presiunea de injectare va fi mai mare, cu atât mai vâscoasă devine topitura.

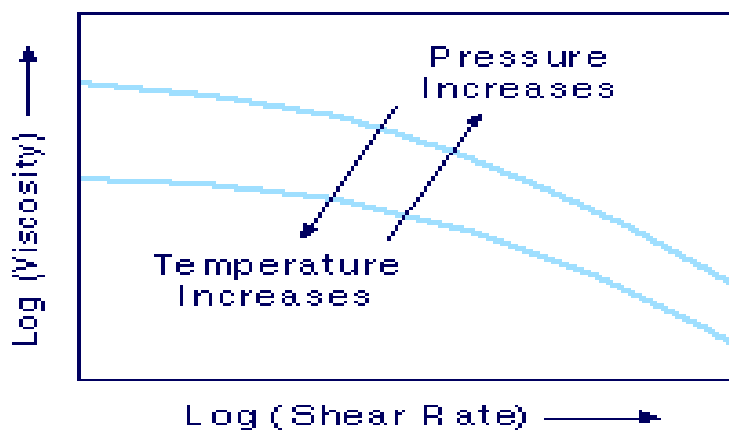


Figura 4.8 Dependența vâscozității topiturii de polimer în funcție de viteza de forfecare, presiune și temperatură [BAR07]

Mai mult, orice factor care influențează viteza de forfecare are o influență mai mult sau mai puțin semnificativă asupra vâscozității, în funcție de material, Figura 4.9.

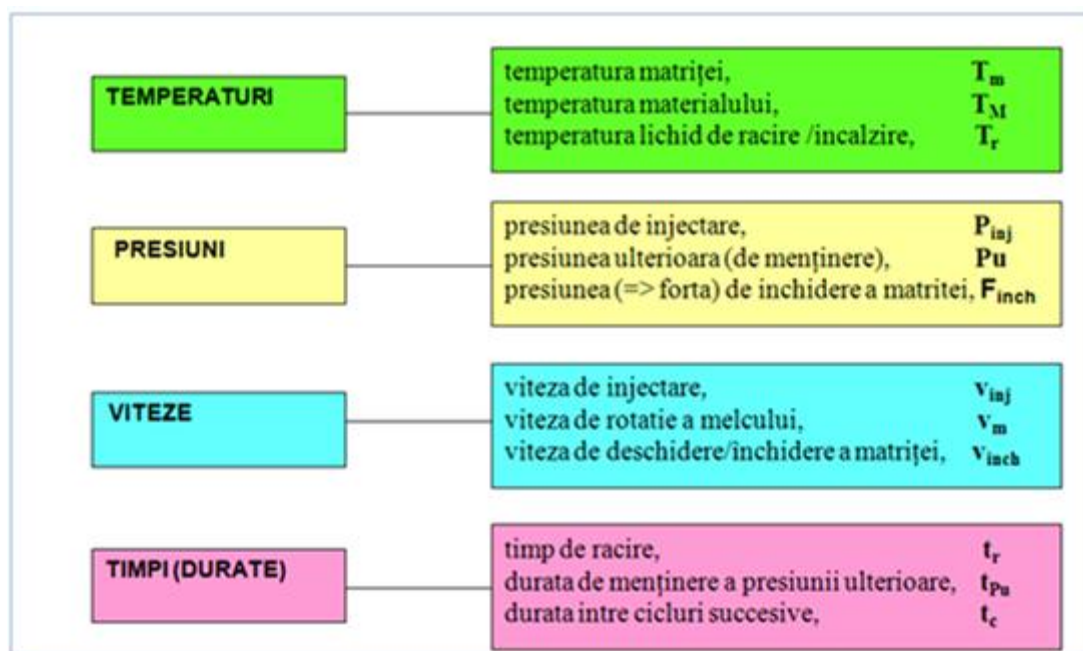


Figura 4.9 Factori de influență asupra calității produsului injectat.

Parametrii de reglaj mașină de injectat

4.3. Activarea ultrasonică

4.3.1. Definirea principiului de activare

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

Datorită continuității mediului elastic, deplasarea unui punct material sub acțiunea forței exterioare perturbatoare crează în mediul de propagare tensiuni elastice care acționează în fiecare micro volum și determină abaterea fiecărei particule a mediului continuu de la poziția ei normală, de echilibru, cu valoarea infimezimală x .

Poziția particulelor învecinate este de asemenea modificată, iar ca răspuns, în baza principiului acțiune-reacțiune, acestea dezvoltă forțe de reacțiune, ce tind să aducă la starea inițială particula a carei poziție a fost perturbată. Se crează astfel condițiile de propagare, sub formă de undă, a perturbației inițiale determinată de acțiunea unei forțe exterioare. Ca urmare a manifestării forțelor de inerție, proprii oricarei mișcări, particulele continuă să oscileze în jurul unei poziții medii chiar și după trecerea undei.

În condiții ideale (mediul perfect elastic, liniar, omogen, izotrop și conservativ) unda se transmite fără pierderi în mediul activat unde se conservă valoarea amplitudinii de oscilație. În realitate, mediul de propagare este elasto-plastic ceea ce determină pierderi progresive de energie a undei și amortizarea în timp a acesteia, factorul de atenuare fiind în funcție de natura materialului și de proprietățile elastice (Figura 4.10).

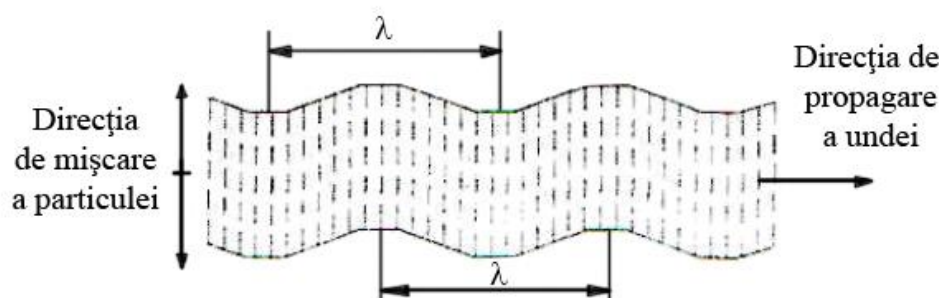


Fig. 4.10. Propagarea undelor elastice transversale; λ – lungimea de undă [SER12]

În cazul în care asupra sistemului acționează o forță exterioară F_0 care variază după o lege armonică de pulsație constantă ω_0 , amplitudinea și perioada de oscilație se mențin la valori constante dar defazajul dintre forța și elongația sistemului este zero doar dacă lipsește amortizarea în sistem, $\delta = 0$ (mediul perfect elastic). În caz contrar, $\delta \neq 0$, interacțiunea complexă dintre particulele mediului determină manifestarea fenomenului de rezonanță, când

amplitudinea oscilațiilor forțate se stabilizează la o valoare constantă și atinge un maxim la o frecvență a forței aplicate, denumită frecvență de rezonanță.

4.3.2. Modele practice de activare

În acest subcapitol se prezintă cele mai reprezentative soluții tehnice, brevete de invenție și diferite standuri pentru matrițele de injectat activate cu ultrasunete aflate în prezent în curs de aplicare și evaluate la firma constructoare de matrițe Nano Inteliform Timișoara.

Invențiile (Brevetele 00793/2006 și 00792/2006, titular Universitatea „Politehnica” 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 4.11 și Figura 4.12). Rezultatul este o semnificativă scădere 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].

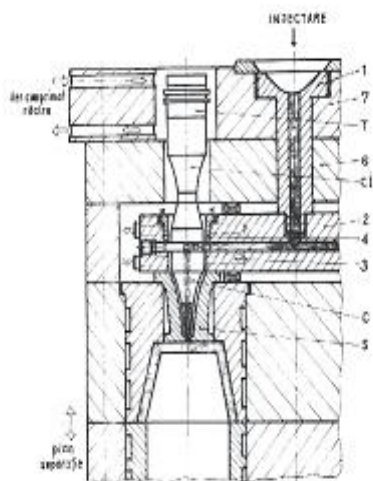


Figura 4.11 Invenția principală [ICL06]

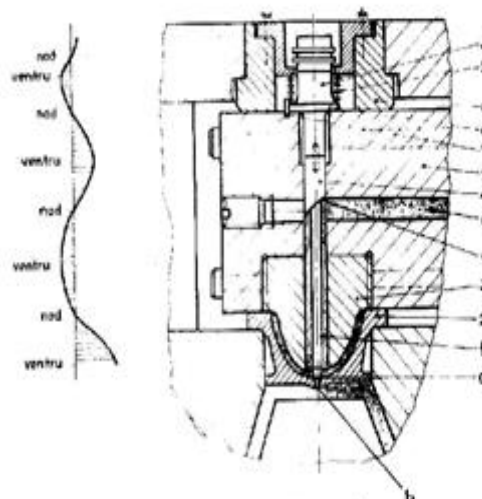


Figura 4.12 Invenția dependentă [ICL06]

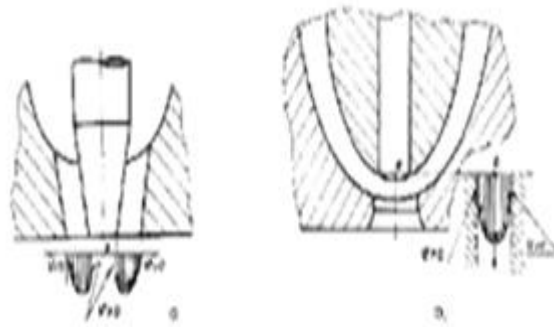


Figura 4.13 Scheme reprezentând distribuția vitezelor de curgere în dreptul duzelor de injectare [ICL06]

În cazul extrudării, soluțiile constructive ale dispozitivelor proiectate sunt redată în Figura 4.14:

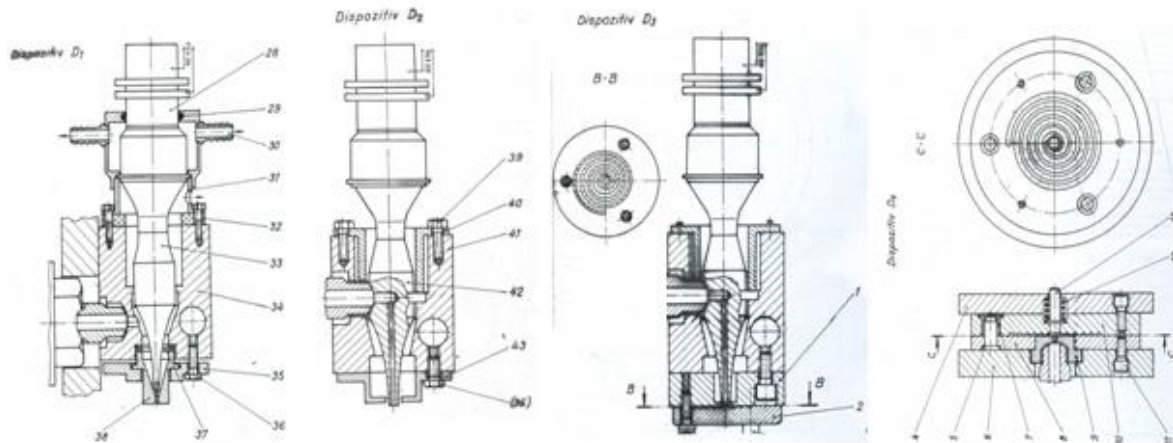


Fig.4.14. Soluții tehnice pentru capete de extrudare activate ultrasonic [construcție UPT]



*Fig.4.15. Echipamentul ultrasonic-generatoare și convertoare (transductor+concentrator)
[construcție UPT]*

4.3.3. Studiul comparativ al brevetelor 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 nici un 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 România „Matriță de injectare activată ultrasonic”

Bv. No. 118400 B/2003 România ”Procedeu și cap de extrudare activat ultrasonic”

Bv. No. 2000271971/2000 Japan „Sprueless miniature runner type mold applying ultrasonic energy”

Bv. 2001001370/2001 Japan “Ultrasonic injection mold”

Bv. 3161317/1991 Japan “Injection compression mold”

Bv. 2001062878/2001 Japan „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 4.16). 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 her

Abstract of JP2001062878

PROBLEM TO BE SOLVED: To suppress the amplitude of ultrasonic waves transmitted in the radial direction of a cavity as small as possible. SOLUTION: In an ultrasonic injection mold for an optical disk having a movable side mold 4, a fixed side mold 3, the disk molding cavity 6 formed between the contact surfaces 3a, 4a of the movable and fixed side molds 4, 3, the stamper 15 arranged to the bottom part of the cavity 6 to form a pit to the surface of a disk and the ultrasonic generating means 7 attached to the mold side mold 4 or the fixed side mold generating means 7 attached to the 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 preformed at places of $n\lambda/4$ ($n=1, 3, 5 \dots$) from an ultrasonic input part.

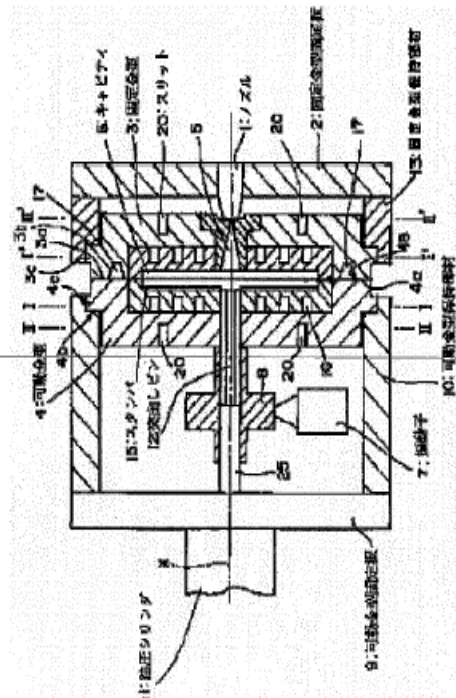


Fig.4.16 – Matriță pentru injectarea discurilor optice activată ultrasonic [Bv. 2001062878/2001 Japan]

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 injecție 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 din România (Figura 4.11).

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.

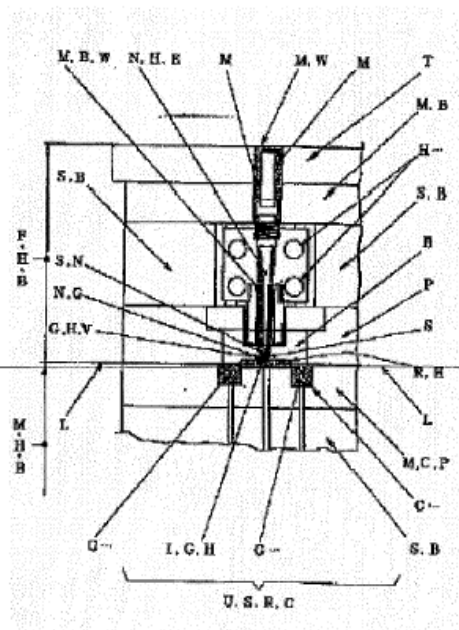


Fig.4.17 Matriță de injecție miniaturală activată ultrasonic [Bv. No. 2000271971/2000 Japan]

O altă soluție tehnică interesantă din punct de vedere al modului de activare ultrasonică este prezentată în figura 4.17. 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.

În prezent se realizează piese de dimensiuni foarte mici (de ordinul micronilor) pentru utilizări în special în microtehnică 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.

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.

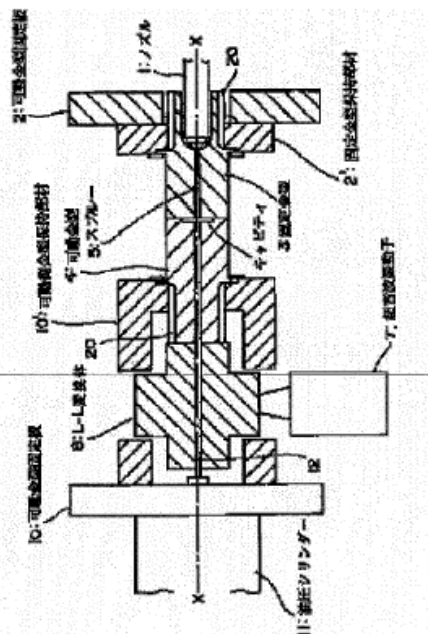


Fig.4.18 Matriță de injectare activată ultrasonic [Bv. 2001001370/2001 Japan]

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.

4.3.4. 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),
- 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 4.19) se pot obține scăderi ale vâscozității polimerului topit cu 50%.

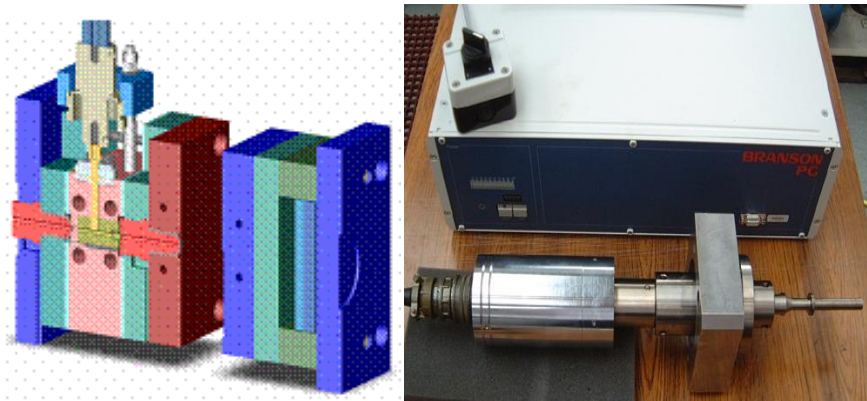


Fig.4.19 Soluție tehnică de activare ultrasonică pentru o matriță de injectare

[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.4.20 – Spirale Griffith corespunzătoare injectării cu sau fără ultrasunete

[www.ultramelt.ro]

Rezultatele principale ale cercetării [www.ultramelt.org]

Scăderi ale vâscozității polimerului topit cu 50%;

Beneficii declarate ca fiind obținabile: reducerea costurilor cu materialele, reducerea forțelor de închidere a matrițelor, posibilitatea injectării pieselor cu pereți subțiri, scăderea temperaturilor topiturii și matrițelor, 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, nano compozite.

Limitele cercetării

Date tehnice inaccesibile privind soluțiile tehnice și procedurile corespunzătoare.

Soluții comerciale în așteptare.

4.4. Experimentul factorial

În studiul experimental al proceselor tehnologice, în vederea optimizării parametrilor acestora, sunt multe cazuri în care sunt implicați doi sau mai mulți factori, având efect direct asupra răspunsului sistemului dar mai ales interacțiunea acestora primând uneori față de cea a factorilor înșiși. În raport cu investigarea prin loturi (batch) și eşantioane (sample) care necesită replici pentru diferite niveluri ale variabilei independente și deci un număr foarte mare de încercări cu costuri neeconomice, experimentul factorial realizează o reducere importantă a numărului de încercări și optimizarea programului de experimentare.

Modelarea cu ajutorul experimentelor factoriale are ca o primă etapă definirea problemei de rezolvat, adică precizarea funcției (funcțiilor) obiectiv, urmată de identificarea factorilor de influență. Problema pusă spre rezolvare trebuie să fie corect definită și să fie consistentă, adică rezolvarea ei să furnizeze informații utile referitoare la procesul sau fenomenul studiat, iar factorii de influență identificați să corespundă caracteristicilor pe care o asemenea mărime trebuie să le îndeplinească.

Pentru un experiment care dezvoltă acțiunea a doi factori A și B la nivelurile a și b, se iau în considerare toate combinațiile posibile ale factorilor la cele două niveluri posibile *minim, codificat (-1)* și respectiv *maxim, codificat (+1)* pentru fiecare dintre ei. Se definește efectul unui factor asupra sistemului schimbarea în răspuns a acestuia produsă de schimbarea sa în nivel (Tabel 4.2). Totodată acesta se mai numește *efect principal*, deoarece se referă la un efect primar a factorului de interes din experiment.

Tabelul 4.2

		Factor B	
		B ₁	B ₂
Factor A	A ₁	20	30
	A ₂	40	52

Cuantificarea efectului principal se face prin diferența mediilor efectelor la nivelul superior și respectiv inferior al factorului:

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21, \tag{1.1}$$

adică creșterea factorului A de la nivelul (-1) la nivelul (+1) implică un răspuns mediu de 21 unități. În mod similar efectul principal al factorului B este:

$$B = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11, \quad (1.2)$$

Se observă că pentru cele două niveluri ale factorului B, la trecere pe cele două niveluri ale factorului A se obține un spor de: $40 - 20 = 20$ și respectiv $52 - 30 = 22$ unități.

Analizând valorile prezentate în Tabelul 4.3 constatăm răspunsuri de sens contrar ale sistemului la evoluția pe cele două niveluri ale factorului A pentru cele două niveluri ale factorului B, adică:

$$50 - 20 = 30 \quad \text{și} \quad 12 - 40 = -28. \quad (1.3)$$

Tabel 4.3

		Factor B	
		B ₁	B ₂
Factor A	A ₁	20	40
	A ₂	50	12

De asemenea, dacă se estimează efectul principal al factorului A, aplicând relația (1.1) rezultă:

$$A = \frac{50 + 12}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 1 \quad (1.4)$$

care fiind foarte mic putem presupune că efectul lui A la diferite niveluri este neglijabil.

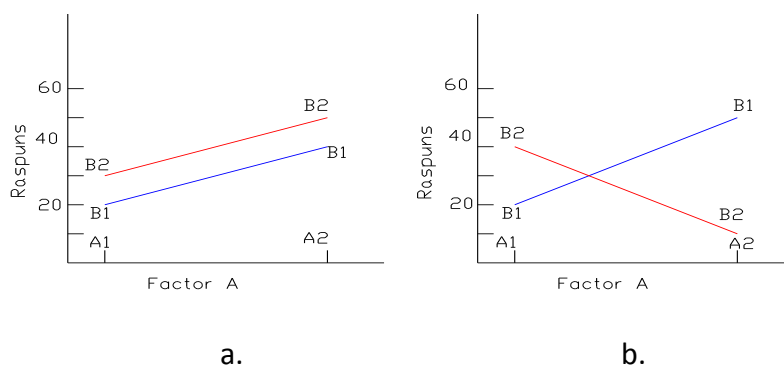


Figura 4.21

Într-o astfel de situație trebuie luate în considerare interacțiunile de tip AB ale factorilor principali. Acest lucru este ilustrat în mod concludent de graficele din figura 4.20, pentru valorile din tabelul 4.1 (figura 4.21a) și tabelul 4.2 (figura 4.21b). Trebuie menționat faptul că prezența unei interacțiuni a doi factori, în unele cazuri, poate masca efectul unui factor principal.

Experimentul factorial prezintă o serie de avantaje în raport cu experimentele care dezvoltă un singur factor la un moment dat. Mai mult, un experiment factorial este recomandat atunci când este suspectă existența interacțiunilor pentru a nu concluziona greșit influența factorilor principali.

4.4.1. Experimentul factorial 2^k

Experimentul factorial cu 2-niveluri (tip 2^k) este experimentul la care fiecare factor (din cei k factori) are 2 niveluri de variație: inferior și superior. Intervalul de variație al unui factor de influență este supus unei restricții naturale, care determină limitele sale inferioară și superioară. Experimentul factorial include toate combinațiile nivelurilor factorilor, indică tendințele majore, deci se poate utiliza pentru determinarea direcției de dezvoltare a experimentelor viitoare.

Un experiment 2^2 (Tabel 4.4) dezvoltă efectul a doi factori fiecare la două niveluri numite “inferior” și “superior” spre exemplu influența temperaturii (factorul A) între valorile: 160°C (A_{\min}), respectiv 220°C (A_{\max}) și a presiunii (factorul B), în intervalul 5 bari (B_{\min}) și 50 bari (B_{\max}).

Tabel 4.4

Combi-națiunile experimentului	Replici ale experimentului			
	I	II	III	Total
A_{\min}, B_{\min}	28	25	27	80
A_{\max}, B_{\min}	36	32	32	100
A_{\min}, B_{\max}	18	19	23	60
A_{\max}, B_{\max}	31	30	29	90

În mod convențional se notează cu A, B, AB efectele principale și interacțiunea factorilor și cu (-) și (+) nivelurile minim și maxim ale acestora. De asemenea în mod convențional se notează cu a, b, ab totalurile pentru răspunsul sistemului la valorile maxime ale factorilor principali, respectiv interacțiunea lor, iar cu (1) răspunsurile sistemului la valorile minime ale factorilor principali. Reprezentarea grafică este prezentată în figura 4.22.

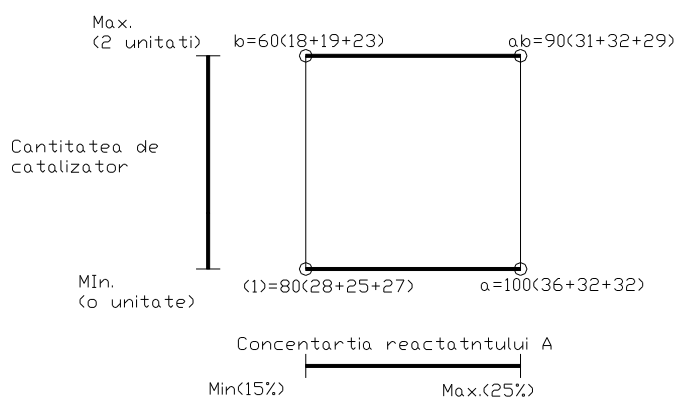


Figura 4.22

Calculul efectelor principale și respectiv a interacțiunii se fac prin calculul mediilor la diferențele răspunsurilor pe fiecare nivel după cum urmează:

$$A = \frac{1}{2n} \{ [ab - b] + [a - (1)] \} = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] = 8.33, \quad (1.3)$$

$$B = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] = -5, \quad (1.4)$$

$$AB = \frac{1}{2n} [ab - (1) - a - b] = \frac{1}{2(3)} (90 + 80 - 100 - 60) = 1.67, \quad (1.5)$$

Alte notații convenționale sunt:

$$\begin{aligned} \text{Contrast}_A &= [ab + a - b - (1)]; \\ \text{Contrast}_B &= [ab + b - a - (1)]; \\ \text{Contrast}_{AB} &= [ab + (1) - a - b], \end{aligned} \quad (1.6)$$

Sumele pătratelor efectelor principale:

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{n \cdot 4}; \quad SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{n \cdot 4}; \quad SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{n \cdot 4}, \quad (1.7)$$

Se observă ca sumele pătratelor de mai sus s-au calculat pentru $2-1=1$ grade de libertate corespunzătoare celor două niveluri ale variabilelor independente.

Suma pătratelor totale se calculează pentru $4 \cdot n - 1$ grade de libertate, iar suma pătratelor erorilor are expresia:

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}, \quad (1.8)$$

Pe baza acestor estimatori se realizează analiza de varianță a efectelor modelului factorial, în tabelul 4.5 fiind redată forma standard pentru exemplul prezentat mai sus:

Tabel 4.5

Sursa de variație	Suma pătratelor	Gradele de libertate	Media pătratelor	F ₀
A	208.33	1	208.33	53.15 ^a
B	75.00	1	75.00	19.13 ^a
AB	8.33	1	8.33	2.13
Eroarea	31.34	8	3.92	
Total	323.00	11		

Analiza dispersională, numită și analiza varianței (ANOVA), este metoda statistică de analiză a datelor de măsurare care sunt valori obținute experimental ale unor funcții obiectiv ce depind de unul sau mai mulți factori de influență cu acțiune simultană, cu scopul de a

stabili semnificația acestor factori asupra funcției obiectiv analizate. Pe baza analizei dispersionale, factorii de influență pot fi clasificați în semnificativi și nesemnificativi. Pentru cazul de față, fiind 1%, se confirmă concluziile rezultate pe baza amplitudinii răspunsului sistemului.

Analiza rezidualilor pe baza modelului de regresie pentru cele 12 răspunsuri (4 combinații x 3 replici) permite determinarea apariției sau nu a unor tendințe de grupare a valorilor. Modelul de regresie are forma:

$$y = \beta_0 + \beta_{1.X_1} + \beta_{2.X_2} + \varepsilon, \quad (1.9)$$

iar coeficienții de regresie:

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y} \quad (2.0)$$

Pe de altă parte, dezvoltarea experimentelor factoriale care implică un număr mare de variabile are neajunsul că mărește foarte mult numărul încercărilor fără a da întotdeauna un răspuns cert din punct de vedere fizic. Din acest motiv literatura de specialitate recomandă pe de o parte dezvoltarea treptată a experimentului în funcție de ponderea pe care o au factorii investigați. A doua metodă este cea de dezvoltare a experimentelor fracționare chiar dacă rezoluția acestora scade datorită faptului că la un moment dat avem ca și răspuns o sumă a influenței unui factor principal și a unei fracțiuni a interacțiunilor (secundare) datorate factorilor principali. Pentru a trage o concluzie este necesară dezvoltarea în continuare a experimentului, cu o altă fracțiune opusă primei. Dacă tendința de răspuns se păstrează rezultă ca și concluzie că ponderea o dețin factorii principali. Dacă tendința de evoluție este opusă este probabil ca interacțiunile să predomine. Pentru a lămurii acest aspect să considerăm un experiment care dezvoltă 7 factori principali. Un astfel de experiment este destul de mare și ar comporta $2^7 = 128$ de încercări pentru rulare completă și deci pentru o rezoluție maximă.

4.4.2. Parametrii de studiu pentru experimentul factorial

Scopul cercetărilor experimentale este de a verifica influența activării ultrasonice asupra comportamentului reologic a topiturii de polimer, ca factor cu efect independent sau cu efect coroborat cu interacțiunea altor factori de influență. Așa cum s-a arătat în cap.4.3, pentru cazul când este suspectă existența interacțiunilor pentru a nu concluziona greșit influența factorilor principali sau efectele combinate ale acestora, se recomandă abordarea studiului experimental în varianta experimentului factorial.

Conform celor prezentate în cap 4.1 și cap. 4.2, dinamica transferului topiturii prin canalele matriței (secțiuni libere, de curgere) este influențată în mod evident de tipul materialului folosit dar și de :

- temperatura topiturii;
- presiunea de injectare;
- valoarea interstițiului de curgere (cota transversală a secțiunii de curgere);
- viteza de injectare;
- temperatura matriței;
- rugozitatea peretelui canalului de curgere;
- ș.a.

Activarea ultrasonică este susceptibilă a fi un factor de influență asupra comportamentului reologic a topiturii, la injectare, *probarea sau invalidarea acestei ipoteze fiind scopul principal al proiectului*. Ca o concluzie logică desprinsă din rezultatele unor încercări anterioare, activarea ultrasonică ar avea efect maxim pentru un material cu vâscozitate ridicată. Studiile de extrudare activată ultrasonic arată creșteri spectaculoase de debit în vecinătatea punctului T_v , tranzitoriu între faza lichidă și cea solidă, pentru vâscozitate mare a materialului procesat, Anexa 2

Deoarece un experiment "n" factorial necesită 2^n determinari (a se vedea cap. 4.3), dacă vor fi luați în considerare doar 6 parametrii (primii 5 din lista de mai sus + activarea ultrasonică) pentru un program complet de experimentare ar fi necesare $2^6 = 64$ valori pentru variabila de răspuns, fiecare însemnând un număr minim de 3 ... 5 injectări.

Din motive de optimizare a programului experimental, setul de parametri de intrare a fost redus la 4 (pachet experimental de dimensiune $2^4 = 16$ valori necesare pentru variabila de răspuns, media a câte 3 ... 5 injectări):

- temperatura topiturii;
- presiunea de injectare;
- valoarea interstițiului de curgere;
- activare ultrasonică.

Viteza de injectare și temperatura matriței vor fi setate la valori maxime pentru materialul de studiu (Anexa 4) care să faciliteze curgerea materialului și manifestarea parametrilor de intrare ramași în studiu.

Materialul cu care vor fi efectuate aceste incercari a fost stabilit in urma unor incercari experimentale preliminare, de determinare a indicelui de curgere (Melt Flow Rate = MFR), cap. 4.6 și Anexa 5.

Variabila de răspuns (funcția obiectiv) pentru experimentul factorial va fi lungimea de traseu parcursă de topitura de polimer prin interstiții de valori diferite (cota transversală a traseului de curgere, $i = 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5$ si $0,6$ mm), în cuiburile matriței proiectate și realizate pentru obținerea piesei din Figura 4.23.

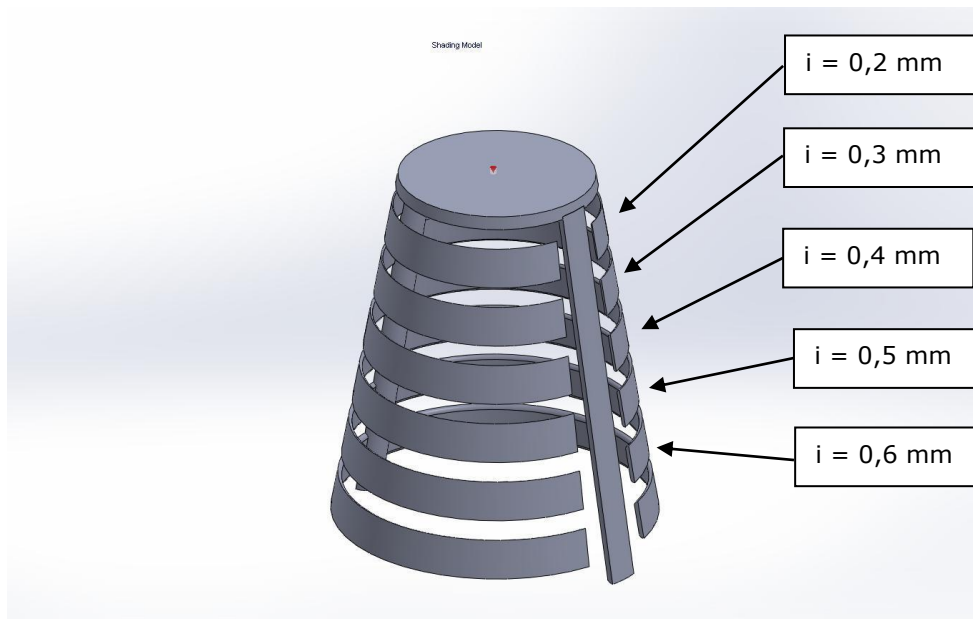


Figura 4.23 Model 3D al piesei pentru programul experimental.

Se va proceda la prelucrarea statistică a datelor experimentale separat pentru cuibul 1, cu activare ultrasonică a duzei finale și apoi pentru cuibul 2, cu activare ultrasonică a poansonului.

4.5. Experimente preliminare și stabilirea materialului folosit

Pentru studiu au fost propuse materialele: polipropilena (PP) (pentru care s-a obținut efect maxim în experimente cu activare ultrasonică a procesului de extrudare), acrilonitril-butadien-stiren (ABS) și policarbonat (PC), ultimele două fiind incluse în listă deoarece au vâscozitate specifică medie, respectiv ridicată, Figura 4.24.

Vâscozitate scăzută [Pa s]	Vâscozitate medie [Pa s]	Vâscozitate ridicată [Pa s]
PPA	ABS	PC
PE	ASA	PEI
PP	PS	PMMA
SB	PA (amorf)	PSU
CA	SAN	PEEK
TPU	PVC soft	PPS
PA6	CAB	PVC rigid
PA6.6	PPO	PES
PBT	PP	FEP
POM	PAEK	PPE
PET	LCP	ETFE

Figura 4.24 Grupe de materiale polimerice după vâscozitatea specifică [SAW04]

Pentru acestea au fost efectuate teste de determinare a indicelui de curgere (Melt Flow Rate = MFR, Anexa 4) cu scopul:

- stabilirii evoluției vâscozității cu temperatura (util în stabilirea limitelor de variație a parametrilor de studiu) ;
- stabilirii materialului folosit la încercări experimentale (materialul cu curgerea mai dificilă, cu vâscozitate ridicată).

Rezultatele acestor teste preliminare sunt prezentate în Anexa 5 și sunt sintetizate în graficele din Figura 4.25.

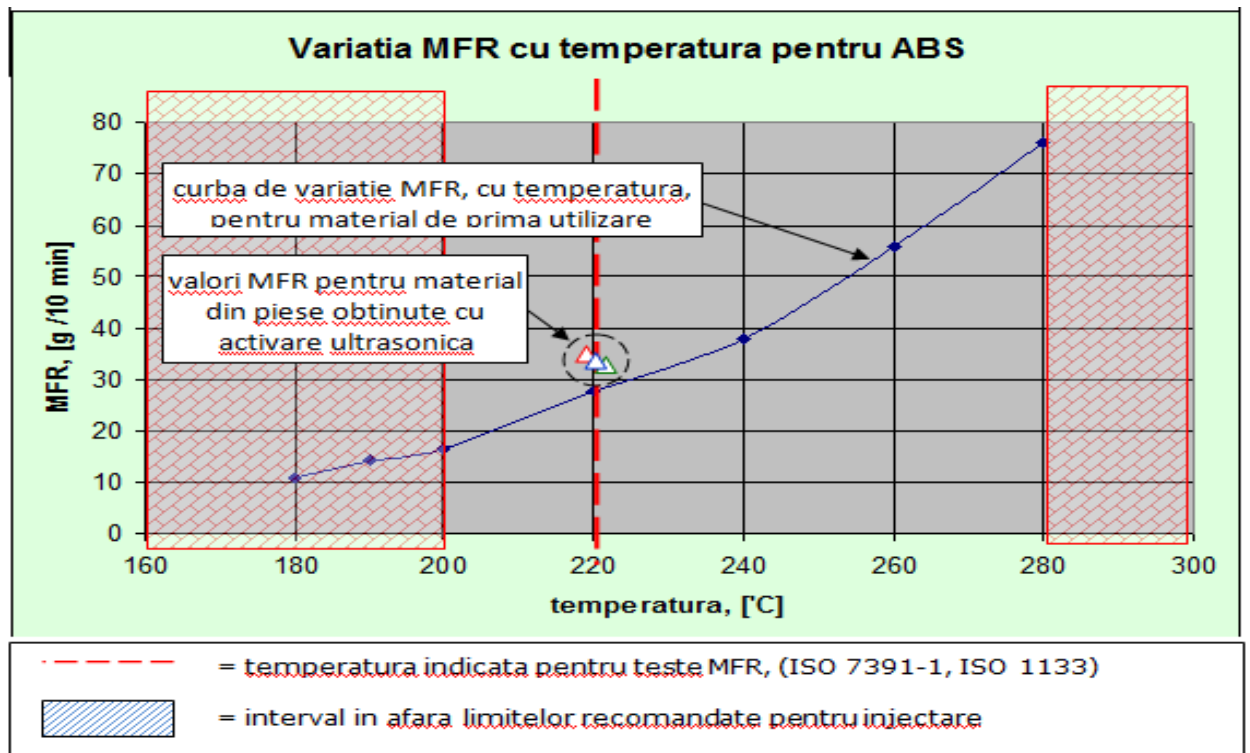
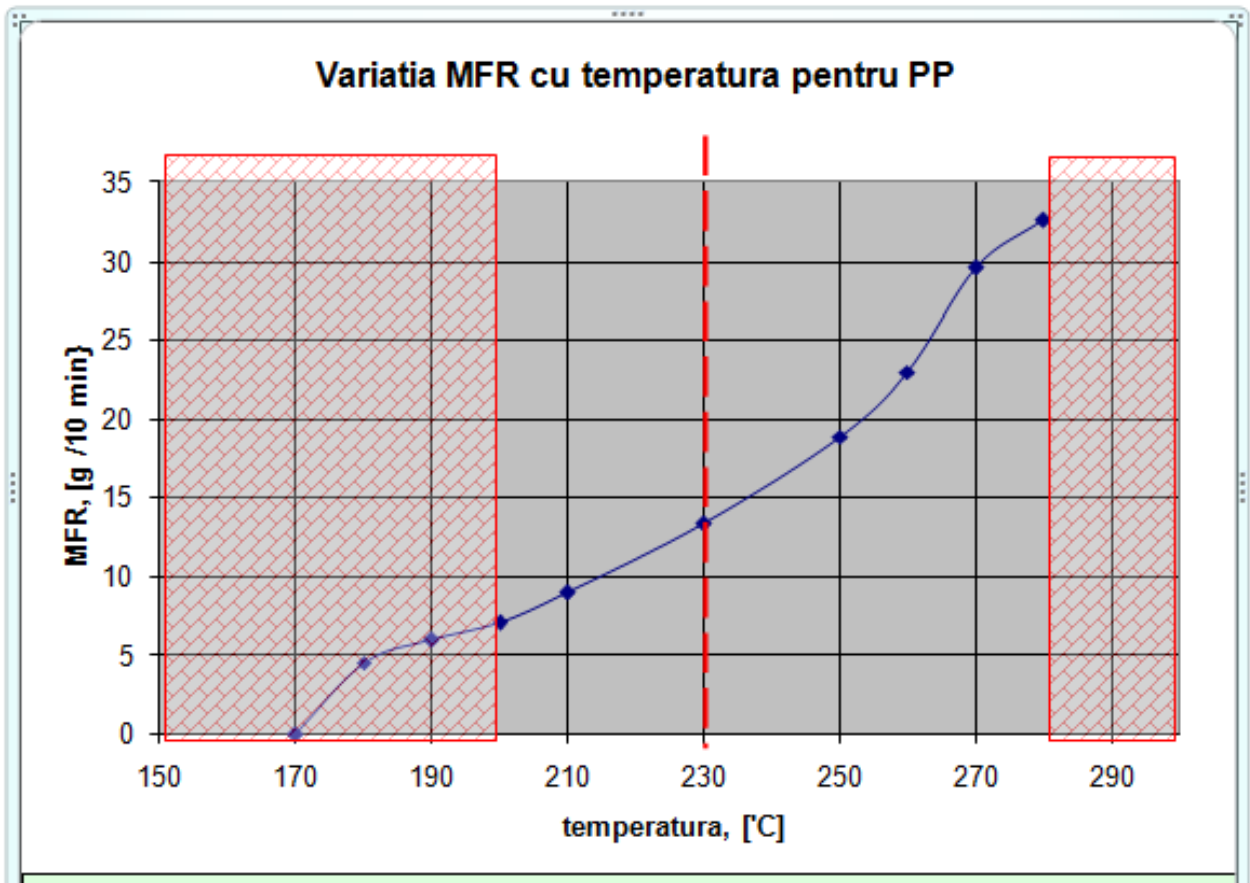
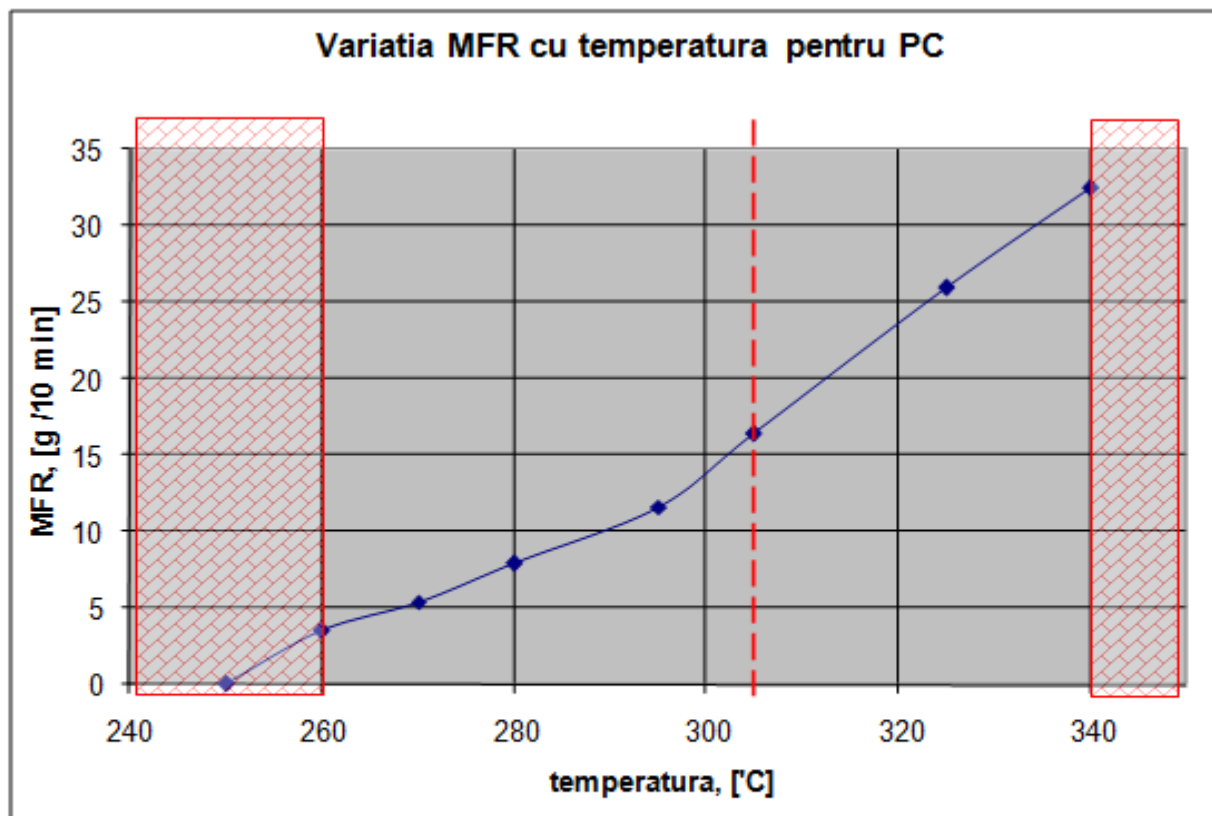


Figura 4.25 Variatia indicelui de curgere (MFR) cu temperatura pentru PP, ABS si PC (a)



--- = temperatura indicata pentru teste MFR, (ISO 7391-1, ISO 1133)

= interval in afara limitelor recomandate pentru injectare

Figura 4.26 Variația indicelui de curgere (MFR) cu temperatura pentru PP, ABS și PC (b)

Condițiile de determinare a MFR sunt prezentate în Tabelul 4.6:

Tabelul 4.6

Material	Temperatura de injectare min / max [°C], Anexa 3a	Temperatura test MFR, [°C]	Încărcare (load), [kg]	Presiunea echivalentă, ASTM D-1238	Valoare orientativă MFR, [g/10 min], Anexa 3a
PP	200 ÷ 280	230	2,16	298,2	20
ABS	200 ÷ 280	220	10,00	1379,0	35
PC	260 ÷ 340	305	1,20	165,4	20

Se constată că pentru ABS încărcarea pistonului se face cu sarcina de 10 kg, care generează o presiune echivalentă de 5 ...8 ori mai mare decât pentru PP și PC, iar creșterea

valorii MFR este relativ modestă, de doar 1,75 ori (35/20), dovada a unei vâscozități semnificative și a unei rezistențe mai mari opusă la curgere.

Din acest motiv, materialul propus pentru încercări a fost ABS, pentru care, dacă activarea ultrasonică ar avea efect favorabil, ar fi de așteptat ca lungimea traseului de curgere să crească în aceste condiții de procesare.

4.6. Stabilirea limitelor de variație a interstițiului de curgere.

Pentru a studia capacitatea reologică a topiturii de a pătrunde prin spații înguste și de a parcurge un traseu cât mai lung a fost propusă și modelată 3D piesa din Figura 4.26, cu interstiții de curgere în serie de 0,2 ... 0,6 mm, increment 0,1 mm, interstițiul cu valoarea minimă fiind amplasat înspre punctul de injectare.

Lungimea de traseu parcursă de topitură pe fiecare ramură a piesei ($i = 0,2 \dots 0,6$ mm) va fi variabila de răspuns (funcția obiectiv) în experimentul factorial. Simulările de curgere a materialului în matriță, cap. 5.1, arată că o astfel de configurație a piesei poate fi folosită pentru studiul capabilităților reologice ale topiturii, gradul de umplere a ramurilor crește odată cu majorarea temperaturii și este mai scăzut pentru interstiții de valoare mică (cele din vecinătatea punctului de injectare).



Figura 4.27 Piesă injectată

În general, informațiile referitoare la parametrii de procesare prin injectare nu sunt exprimate prin valori numerice exacte ci sunt date sub forma unui interval de valori.

Pentru materialul propus a fi folosit, ABS, surse documentare indică pentru temperatură și presiunea de injectare valorile din Tabelul 4.7.

Tabel 4.7

	Sursa de informație		
	Anexa 3a	Anexa 3b	Anexa 3c
Temperatura injectare, [°C]	200 ... 280	220 ... 260	160 ... 274
Presiune injectare, [bar]	neprecizat	800 ... 1600	400 ... 1300
MFR, [g /10 min]	35	neprecizat	neprecizat

În practica industrială, pentru injectarea produselor cu pereți subțiri se setează parametrii de temperatură și presiune ai mașinii de injectat la valori înspre partea superioară a intervalului recomandat. Dar informațiile tehnice referitoare la „perete subțire” sunt rezervate (sau inexistente) pentru grosimi de perete de sub 0,5 mm, Figura 4.27.

Deoarece am constatat că sursa documentară Anexa 3a este printre puținele care corelează parametrii recomandați cu o valoare informativă a MFR am considerat necesară efectuarea de teste MFR pentru materialele propuse spre studiu pentru a identifica un interval de temperaturi optim pentru aplicarea activării ultrasonice.

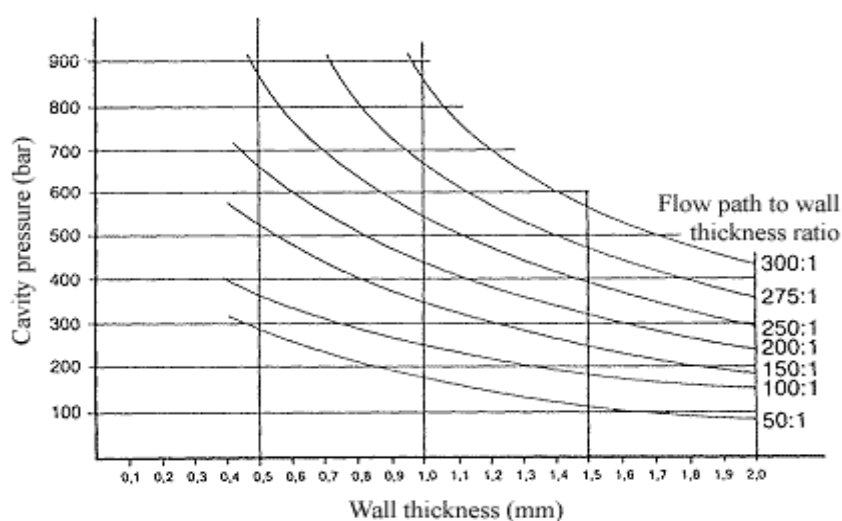


Figura 4.28 Corelarea presiunii de injectare – lungime de traseu parcurs, în funcție de interstițiul de curgere, [Mal 94]

Prin încercări succesive, de injectare *cu activare ultrasonică* s-a stabilit perechea de valori maxime de temperatură și presiune (condițiile cele mai favorabile de umplere a cuibului) astfel încât interstițiul de valoare maximă ($i = 0,6$ mm) să fie complet umplut. Ramurile de interstițiu mai redus ($i \leq 0,5$ mm) au fost, desigur, incomplet formate la valorile $T_{\max} = 280$ °C, $p_{\max} = 2000$ bar.

A fost necesară majorarea presiunii peste valorile recomandate în sursele de informație disponibile din necesitatea de a obține o umplere, chiar incompletă, a ramurilor de interstițiu redus. Chiar și pentru aceasta valoare extremă, se poate considera ca în cuib presiunea este mult mai mică (coeficient de demultiplicare = aproximativ 0,5), Figura 4.29.

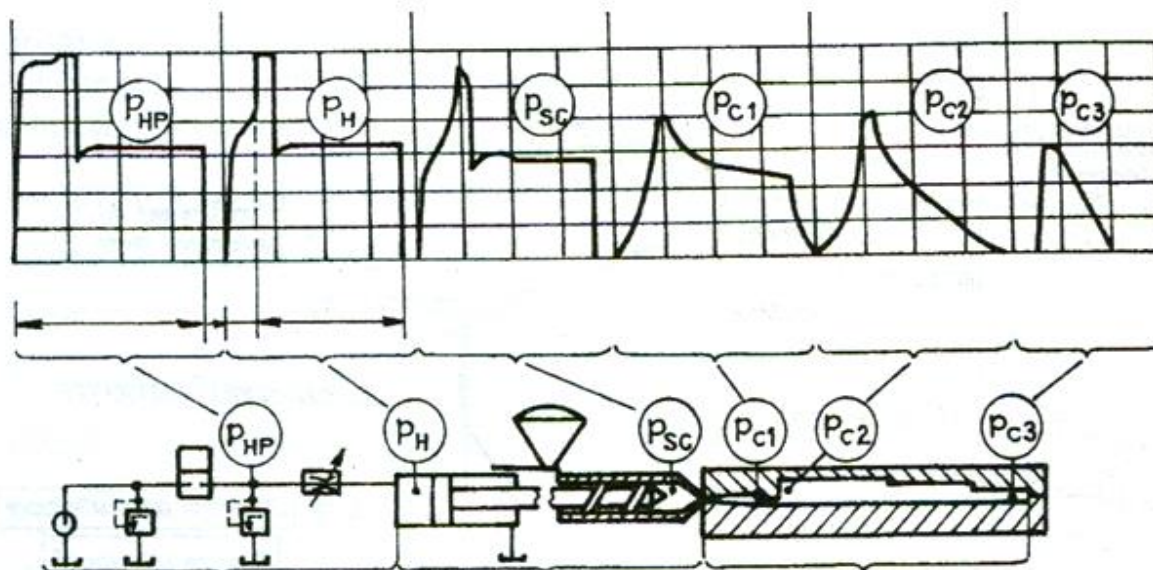


Figura 4.29 Modificarea presiunii de injectare până în cuibul matriței [ICL 06]

Valorile minime ale acestor parametri de reglaj au fost stabilite prin încercări succesive de injectare fără activare ultrasonică astfel încât să se obțină totuși o lungime de parcurs și pe traseele de interstițiu 0,3 ...0.4 mm, $\Rightarrow T_{\min} = 230 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\min} = 1500 \text{ bar}$. Valoarea T_{\min} este plasată spre mijlocul intervalului de temperaturi de procesare, tocmai pentru a facilita umplerea interstițiilor cuibului.

Deasemenea, s-a urmărit și obținerea unui echilibru între mărimea intervalului de variație (min \leftrightarrow max) pentru cei doi parametri și evitarea unei situații de tipul: interval mare de valori pentru temperatură și foarte îngust pentru presiune.

Procedând astfel, pentru presiune și temperatura de injectare au rezultat valorile prezentate în Tabelul 4.8.

Tabelul 4.8 Intervalul de variație a factorilor de influență

Presiune [bar]		Temperatură [$^{\circ}\text{C}$]		Interstițiu [mm]		Activare ultrasonică (amplitudine maximă)	
-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
150	2000	230	280	0,2	0,5	Fără activare	Pentru activare duza finală: Frecvență: 35 kHz Putere: 10 % ($P_{\text{nom}} = 1\text{kW}$) Pentru activare poanson: Frecvență: 20 kHz Putere: 10 % ($P_{\text{nom}} = 1\text{kW}$)

Pentru interstițiul de curgere, dacă pentru T_{max} , p_{max} cu activare ultrasonica s-a umplut ramura $i = 0,6$ mm, măsurarea lungimii de traseu parcurs s-a făcut pe ramurile $i = 0,2 \dots 0,5$ mm, incomplet formate (pe cea de $i = 0,6$ mm probabil topitura ar fi parcurs un drum mai lung dacă ar fi avut mai mult spațiu liber).

Astfel, pentru experimentul factorial, valorile extreme pentru interstițiu au fost $i_{min} = 0,2$ mm și $i_{max} = 0,5$ mm iar măsurarea lungimii de traseu parcurs s-a făcut pe aceste ramuri ale pieselor injectate, cu și fără activare ultrasonică.

4.7. Planificarea experimentului factorial

Considerând ca și funcție obiectiv lungimea parcursă de materialul plastic la diverse regimuri de injectare iar ca factori de influență presiunea de injectare, temperatura de injectare, interstițiul creat, respectiv injectarea în absența sau prezența activării cu ultrasunete a duzei, respectiv a poansonului-cuibului, au fost alcătuite 4 programe experimentale. Programele experimentale au fost astfel concepute încât rezultatele să poată fi prelucrate statistic conform metodei Screening Design utilizând programul de calcul Statgraphics®. În vederea micșorării ponderii erorilor, experimentările au fost programate a se efectua în ordine aleatoare. Pentru fiecare factor de influență s-a luat, codificat, valoarea minimă (-1) și valoarea maximă (+1). După încercări preliminare, de injecție cu și fără activare ultrasonica, s-au stabilit valori concrete, de minim și maxim, pentru fiecare factor de influență, Tabel 4.8.

4.7.1. Planificarea experimentului factorial la injectarea fără activarea duzei

Pornind de la cei 3 factori de influență (presiune, temperatură, interstițiu) a fost creat experimentul factorial 2^3 (Tabelul 4.9), rezultând în total un număr de 8 experimente.

Tabelul 4.9 Matricea program 2^3 la injectarea fără activarea duzei

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)			Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Lungime parcursă [mm]
1	-1	-1	+1	26
2	-1	+1	-1	5
3	-1	+1	+1	38
4	+1	+1	+1	47
5	+1	+1	-1	8
6	+1	-1	+1	30
7	-1	-1	-1	0
8	+1	-1	-1	1

4.7.2. Planificarea experimentului factorial la injectarea cu activarea duzei

În acest caz a fost introdus și cel de al patrulea factor de influență: activarea cu ultrasunete a duzei, rezultând un experiment factorial de tipul 2^4 (Tabelul 4.10), cu 16 experimente.

Tabelul 4.10 Matricea program 2^4 la injectarea cu activarea duzei

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)				Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Activare US [-1=NU; +1=DA]	Lungime parcursă [mm]
1	+1	+1	+1	-1	47
2	+1	-1	+1	+1	38
3	+1	+1	+1	+1	52
4	+1	+1	-1	-1	8
5	-1	+1	-1	+1	17
6	-1	+1	+1	-1	38
7	-1	-1	+1	-1	26
8	-1	-1	-1	-1	0
9	-1	-1	-1	+1	8
10	-1	1	-1	-1	5
11	+1	-1	-1	+1	11
12	+1	-1	+1	-1	30
13	-1	+1	+1	+1	46
14	+1	+1	-1	+1	20
15	-1	-1	+1	+1	31
16	+1	-1	-1	-1	1

4.7.3. Planificarea experimentului factorial la injectarea fără activarea poansonului-cuibului

Sunt luați în considerare cei 3 factori de influență (presiune, temperatură, interstițiu) rezultând un experimentul factorial 2^3 (Tabelul 4.11), cu un număr de 8 experimente.

Tabelul 4.11 Matricea program 2^3 la injectarea fără activarea poansonului

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)			Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Lungime parcursă [mm]
1	-1	+1	+1	32
2	+1	-1	-1	2
3	-1	-1	-1	0
4	-1	-1	+1	21
5	-1	+1	-1	5
6	+1	-1	+1	26
7	+1	+1	+1	41
8	+1	+1	-1	10

4.7.4. Planificarea experimentului factorial cu activarea poansonului-cuibului

În acest caz a fost introdus și cel de al patrulea factor de influență: activarea cu ultrasunete a poansonului, rezultând un experiment factorial de tipul 2^4 (Tabelul 4.12), cu un număr de 16 experimente.

Tabelul 4.12 Matricea program 2^4 la injectarea cu activarea poansonului-cuibului

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)				Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Activare US [-1=NU; +1=DA]	Lungime parcursă [mm]
1	+1	-1	+1	+1	30
2	+1	+1	+1	+1	43
3	+1	-1	-1	-1	2
4	-1	+1	+1	-1	32
5	-1	-1	-1	-1	0
6	-1	-1	+1	+1	24
7	-1	+1	-1	-1	5
8	+1	-1	+1	-1	26
9	-1	+1	+1	+1	36
10	-1	+1	-1	+1	14
11	-1	-1	+1	-1	21
12	+1	-1	-1	+1	7
13	-1	-1	-1	+1	6
14	+1	+1	-1	-1	10
15	+1	+1	+1	-1	41
16	+1	+1	-1	+1	18

4.8. Concluzii și recomandări privind proiectarea matriței cu activare ultrasonică

Matrița cu activare ultrasonică constă în adaptarea tije extractoare obișnuită utilizată doar pentru evacuarea piesei solidificate în urma injectării în matriță pentru a permite introducerea energiei ultrasonice de activare în zona activă din vecinătatea duzei cubului matriței pe de o parte și pentru a ușura evacuarea pieselor de tip tub cilindric de pe altă parte.

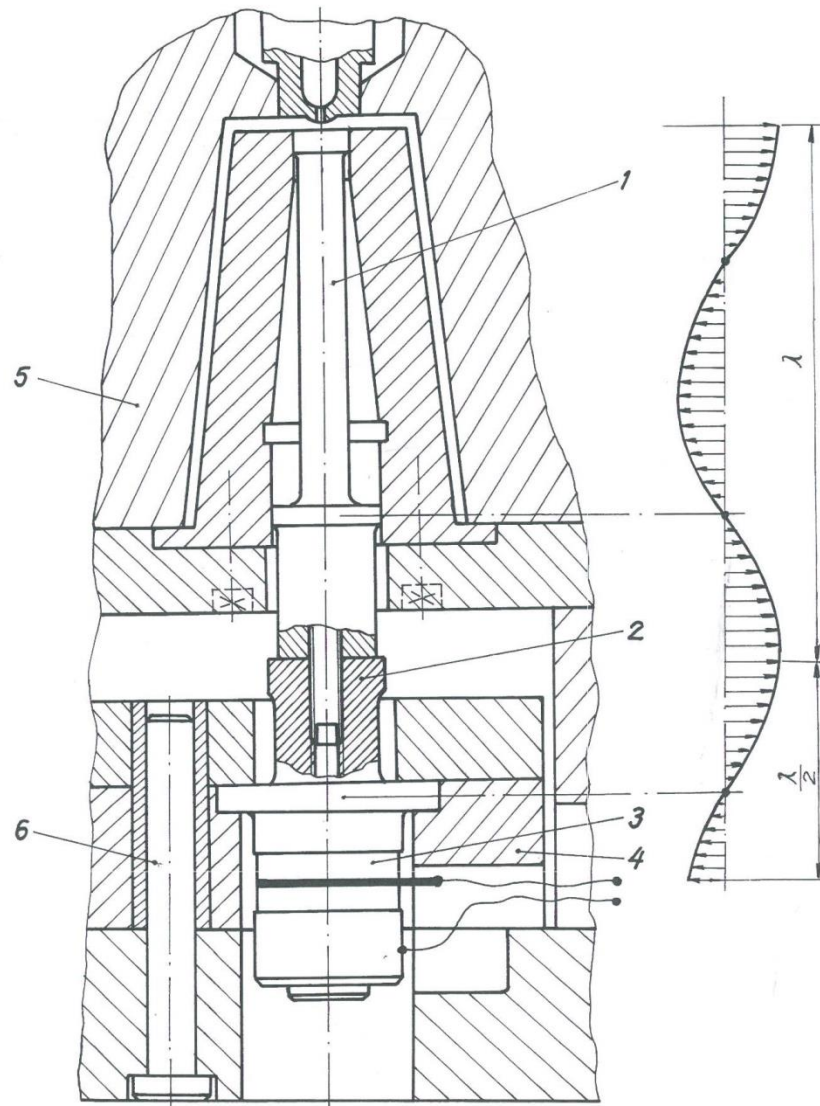


Figura 4.30 Matriță cu activare ultrasonică [CBI RO129156]

Unde în prima variantă de realizare (fig. 4.30) o tijă de evacuare 1 a cărei capăt activ se găsește în poziție centrală în zona superioară a cuibului matriței și în vecinătatea duzei de injectare în cuib este dimensionată ca și un concentrator adaptor de undă de lungime 2λ . Lungimea λ , este lungimea de undă a ultrasunetelor în propagarea lor pe direcție longitudinală și este determinată prin calcul de dimensionare și depinde de caracteristicile materialului (viteza sunetului) folosit pentru confecționarea tije de evacuare și de frecvența de ultrasonică

de activare, cuprinsă între 20 și 100 KHz pentru aplicații tehnologice. La partea activă tija de evacuare are o dimensiune transversală de minimum 5 mm pe considerente de asigurare a rezistenței mecanice la activarea ultrasonică și maximum 15 mm pentru a asigura o transmitere eficientă a energiei ultrasonice la grade reduse de concentrare. La capătul activ al tije de evacuare se realizează pe o porțiune un ajustaj alunecător cu un poanson 5 al cuibului matriței astfel încât la vibrarea ultrasonică a tije extractor aceasta să se poată deplasa axial în ajustaj și să transfere la o densitate ridicată energia ultrasonică în zona vecină injectării în cuibul matriței. De asemenea în zona nodală a tije de evacuare se realizează pe o porțiune limitată un ajustaj alunecător cu poansonul. Poansonul matriței definește partea internă a piesei injectate și realizează la partea lui inferioară un ajustaj alunecător cu porțiunea nodală a tije de evacuare care se plasează pe lungime la distanța de $3 \lambda/2$. La capătul opus al tije de evacuare se realizează cuplarea acustică prin atașare mecanică la un convector ultrasonic alcătuit dintr-un concentrator intermediar 2 și un transductor piezoelectric 3. Ansamblul concentrator intermediar și transductorul piezoelectric sunt montați prin strângere în zona nodală a ansamblului într-un pachet de plăci deplasabile 4 din construcția matriței care are rolul de a asigura deplasarea necesară evacuării piesei din cuiburile matriței ghidată fiind această deplasare pe un sistem de ghidare 6 format din bușe și coloane. În faza de injectare a materialului plastic în cuibul matriței, capătul tije de evacuare realizează prin suprafața sa frontala transmiterea energiei ultrasonice în cuib, în zona de injectare din vecinătatea duzei și asigură îmbunătățirea procesului de curgere și umplere a matriței prin producerea efectului ultrasonic termo-pelicular (încălzirea în volum și reducerea frecării la suprafață). După umplerea cuibului, activarea ultrasonică se întrerupe și se reia la ciclul următor. Este posibil ca în cazul cuiburilor la care forma poansonului este cilindrică, iar evacuarea prin acțiunea tije de evacuare devine dificilă, să se comande activarea ultrasonică care să ușureze evacuarea piesei injectate [CBI RO129156].

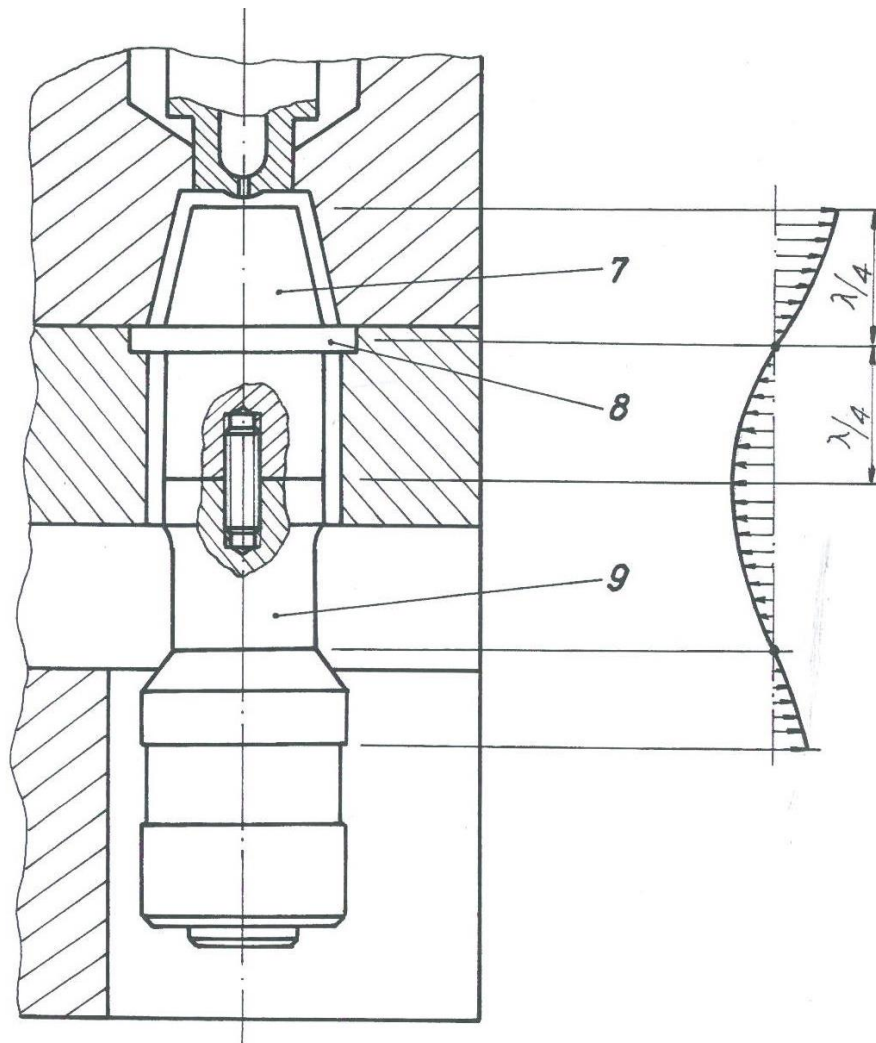


Figura 4.31 Matriță cu activare ultrasonică [Brevet de invenție RO129156-A0]

În a doua variantă de realizare (figura 4.31) cuibul matriței este alcătuit dintr-un concentrator adaptor de undă 7 a cărei parte activă de lungime $\lambda/4$ de formă conică sau cilindrică reprezintă poansonul cuibului matriței. Concentratorul adaptor de undă este încastrat printr-o flanșă 8 plasată în zona nodală în ansamblul plăcilor port cuib al matriței. Concentratorul adaptor de undă asigură conversia energiei ultrasonice pentru activarea cuibului matriței. În cazul acestei variante constructive activarea ultrasonică este distribuită diferențiat în capătul activ al concentratorului adaptor de undă, mai puternic pe suprafața frontală și diminuându-se progresiv pe partea laterală spre zona de flanșă. Această variantă constructivă, fără tije de evacuare presupune activarea ultrasonică la faza de umplere a cuiburilor matriței pentru activarea procesului de curgere, dar și activarea ultrasonică la evacuare prin desprinderea piesei injectate de pe poanson ca urmare a efectului ultrasonic termo-pelicular (reducerea frecării la suprafață) [Brevet de invenție RO129156-A0].

Matrița experimentală, soluția aleasă, Figura 4.32, s-a dovedit a corespunde obiectivelor cercetării, de a stabili modul în care activarea ultrasonică influențează lungimea de traseu parcurs de topitura de polimer. Problema pe care o rezolvă această invenție este aceea de a realiza o matriță de injectare destinată fabricării de calitate a pieselor miniaturale, care să evite pericolul solidificării necontrolate a materialului în spațiile reduse de curgere.

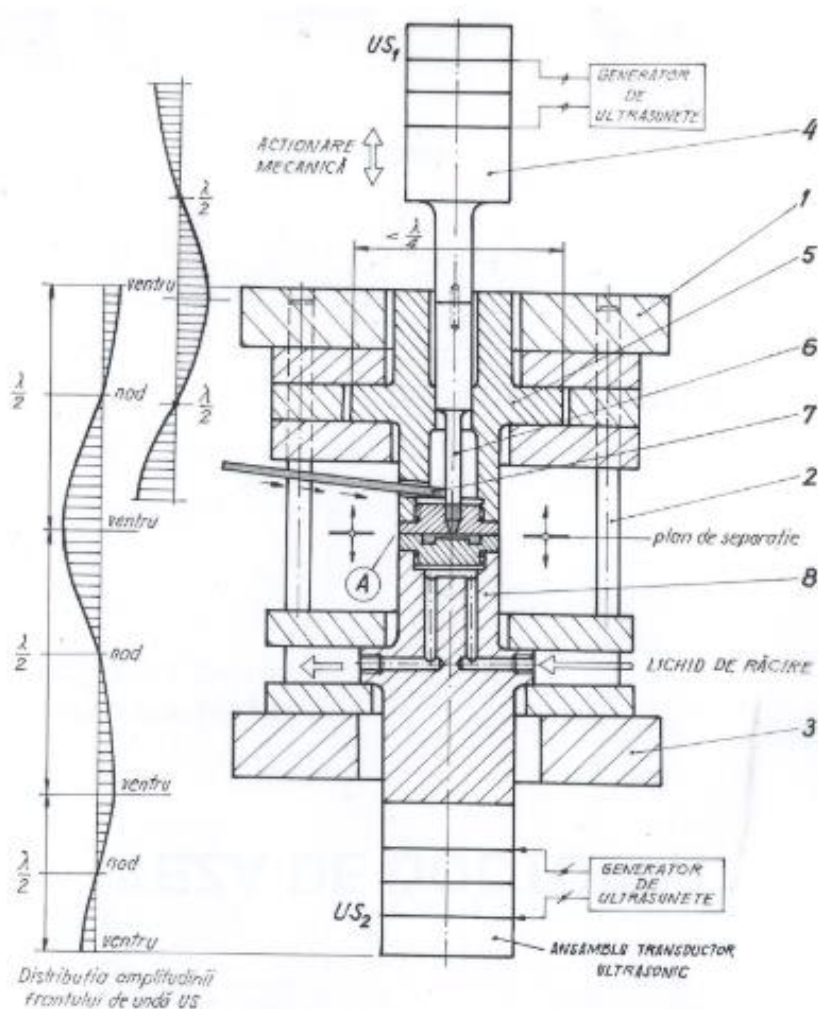


Figura 4.32 Matriță și procedeu de injectare a pieselor miniaturale [Brevet de invenție RO 129443-A0]

Configurația specială a piesei pentru care s-au proiectat cuiburile matriței, Figura 4.33, a permis efectuarea programului de cercetare sub formă unor experimente factoriale și, mai mult, a permis identificarea valorii de interstițiu utilizat în proiectarea matriței cu activare ultrasonică.

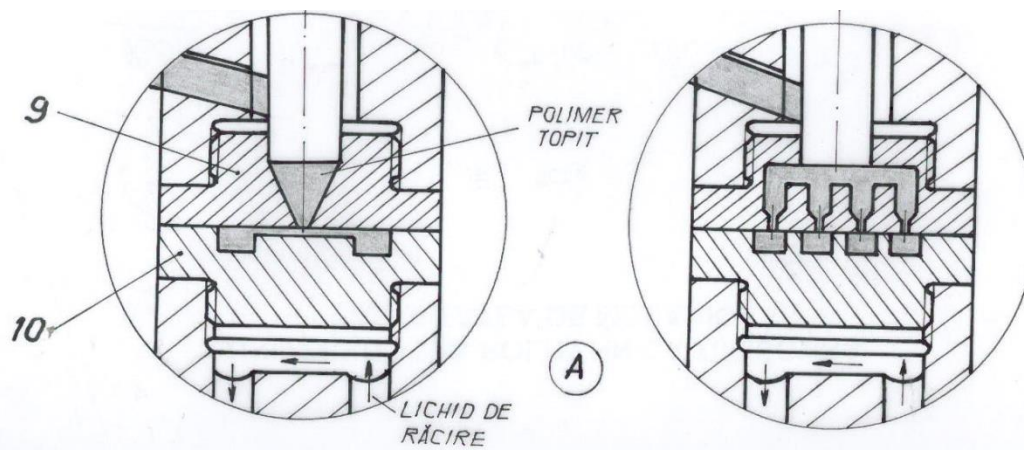


Figura 4.33 Secțiunea A din matrița de injectare a pieselor miniaturale [Brevet de invenție RO 129443-A0]

Conform invenției, matrița este o construcție tip sandwich, clasică, constituită dintr-un subansamblu pachet de plăci mobil superior, 1, care se deplasează pentru închidere și deschidere în raport cu un subansamblu pachet fix inferior, 3, ghidat fiind de niște coloane de ghidare, 2. Un ansamblu convertor ultrasonic USI, 4, format din transductor și concentrator alimentat de la un generator de ultrasunete realizează activarea ultrasonică a unui concentrator adaptor de undă, 6, de tip cilindric în trepte care se deplasează ghidat pe porțiunea nodală într-un ajustaj alunecător în interiorul unui corp rezonator, 5, de lungime $\lambda/2$ fixat în zona sa nodală de flanșă în subansamblu pachet de plăci mobil superior, 1, al matriței. Lungimea de $\lambda/2$ corpului rezonator rezultat din dimensionarea pe frecvență ultrasonică de lucru asigură menținerea ventrului de amplitudine pentru oscilațiile ultrasonice în zona planului de separație a matriței în poziția ei închisă. Pe partea laterală a corpului rezonator se află un orificiu care asigură menținerea introducerii în interiorul corpului rezonator și sub capătul concentratorului adaptor de undă, 6, a materialului polimeric de injectat sub forma unei benzi, 7. Capătul corpului rezonator este constituit dintr-o pastilă superioară 9, fixată prin înșurubare și care conține în dreptul concentratorului adaptor de undă o cavitate cilindrică prelungită cu una conică care să asigure pe de o parte muchii tăietoare pentru capătul concentratorului adaptor de undă care va decupa o porțiune din banda polimerică iar pe de altă parte să dirijeze materialul polimeric prin duza conică către planul de separație și rețeaua de injectare în urma topirii acestuia sub acțiunea energiei ultrasonice emisă prin capătul concentratorului adaptor de undă. În partea inferioară a planului de separație se găsește capătul activ al unui convertor ultrasonic 8 (US2), constituit dintr-o pastilă inferioară, 10, fixată prin înșurubare și care poartă pe suprafața ei superioară rețeaua de distribuție și cavitățile cuiburilor în care este injectat materialul polimeric topit și în care se configurează la

solidificare în timpul răcirii piesele miniaturale. Convertorul ultrasonic US2 este fixat în zona nodală de flanșă concentratorului într-un ansamblu pachet de plăci fix care constituie partea inferioară a matriței iar convertorul ultrasonic este alimentat de un generator de ultrasunete sau de același generator de ultrasunete ca și convertorul ultrasonic USI 4. Pentru configurația pastilelor 9 și 10 care alcătuiesc zona de injectare și rețeaua de distribuție cu cuiburile aferente se pot alege fie varianta injectării centrale cu distribuție radială spre cuib fie varianta injectării multipunct pe verticală direct în cuiburile matriței [Brevet de invenție RO 129443-A0].

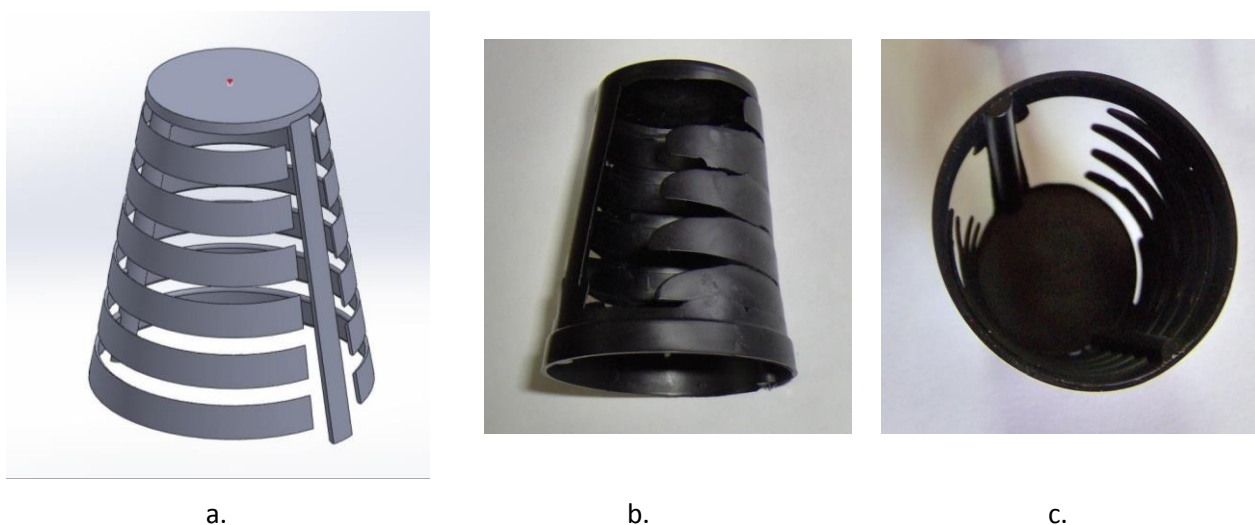


Figura 4.34 Model 3D al cuibului și piese obținute prin injectare în cuibul cu activare ultrasonică a poansonului (cuib2) din matrița experimentală

În cuibul cu activare ultrasonică a poansonului (cuib 2, din figura 4.34c), din necesitatea de a asigura condiții optime de activare și pierderi minime de energie ultrasonică, a fost necesară păstrarea unui interstițiu între poanson și cavitatea cuibului, evitarea contactului metal-metal (poanson-suprafață cuib). În consecință, piesele rezultate prin injectare din acest cuib, mai ales cele obținute în condiții de activare ultrasonică, au o bavură dată de acest interstițiu, între canalele de curgere cu mărimea interstițiului $i = 0,2 \dots 0,6$ mm, figura 4.34b și 4.34c. Activarea ultrasonică favorizează umplerea acestui interstițiu, chiar de valoare foarte redusă. Ca aspect pozitiv a acestei situații, se constată că, de-a lungul secțiunilor libere de curgere a interstițiu $i = 0,3 \dots 0,4$ mm, traseul parcurs de topitură este apreciabil.

Ca aspect negativ pentru situația descrisă mai sus, se poate formula opinia că materialul topit, care are posibilitatea curgerii printre poanson și cavitatea de formare (bavura), induce o scădere (pierdere) de presiune care modifică ușor, în mod nedorit,

comportamentul reologic. Aceasta ar putea fi explicația pentru interacțiunea sensibil mai redusă a factorului de influență "activare ultrasonică" la cuibul cu poanson activat în raport cu duza activată (a se vedea diagramele Pareto din Figurile 5.19 și 5.34)

Pentru soluția constructivă a matriței prototip, de injecție cu activare ultrasonică, se recomandă modificarea geometriei piesei de realizat, la forma conică, de pahar cu grosime a peretelui constantă $i = 0,3$ mm, și execuția de poansoane corespunzătoare (cavitatea cuibului rămâne nemodificată).

Concentratorii de tip ac pentru cuib 1 și poanson pentru cuib 2 se recomandă să fie executați din oțel, material care asigură o bună rezistență la solicitările axiale importante date de materialul polimeric topit, sub presiune. Pentru zona de flanșă, care asigură asamblarea acestora cu elementele componente vecine în matriță, se recomandă a se asigura o grosime de material de minim 2 mm.

În cuibul 1 se recomandă amplasarea unui senzor de temperatură, de tip baionetă, în poanson (neactivat ultrasonic) cu capătul bi-metal cât mai aproape de suprafața poansonului. Astfel, temperatura cuibului ar putea fi monitorizată și injectările ar putea fi comandate controlând mai exact temperatura cuibului, considerată a fi constantă.

Se recomandă amplasarea în această matriță a unor elemente de control a curgerii prin canalele de distribuție a blocului cald, printr-o soluție constructivă cât mai simplă (de ex: dop filetat).

O regulă generală ce trebuie respectată pentru proiectarea și execuția acestei matrițe este respectarea cât mai mult posibil a unei simetrii geometrice:

- la diametrul canalului de curgere în duza finală,
- la secțiunea punctului de injectare,
- la geometria cuibului,
- la sistemul de răcire și cel de ejectare.

Reguli care să asigure un echilibru hidraulic între cuibul 1 și cuibul 2, fără a favoriza curgerea într-o anumită direcție.

Capitolul 5

Validarea experimentală a modelelor teoretice

5.1. Simularea curgerii în matriță

Pentru validarea experimentală a modelelor teoretice s-au efectuat simulări folosind metoda elementului finit (FEM) reprezintă una dintre cele mai bune metode existente de realizare a diferitelor calcule și simulări din domeniul ingineriei. Această metodă și desigur programele care o încorporează au devenit un component de bază ale sistemelor moderne de proiectare asistată pe calculator.

Analizele realizate prin metoda elementului finit (FEM) sunt în zilele noastre indispensabile în majoritatea activităților ingineresti de înaltă performanță. Într-o analiză de tip FEM scopul principal urmărit este obținerea celei mai bune soluții pentru un ansamblu de condiții impuse.

În cazul simulării curgerii prin rețele și cavități în mediul CAE (Computer Aided Engineering) proiectantul poate afla informații prețioase care pot duce la o poziționare eficientă a digurilor cu o pierdere minimă de material. Simularea cu ajutorul calculatorului a proiectării digului constă în numărul de puncte de injectare alese și amplasarea acestora în raport cu piesa, dimensiunile punctului de injectare, lungimea și diametrul digului și stabilirea dimensiunii corecte ale digului.

Pentru piesele cu pereți subțiri acest lucru este foarte important deoarece amplasarea punctului de injectare trebuie realizată cât mai eficient astfel încât să se obțină o umplere echilibrată în matriță. Piesele care prezintă grosimi de pereți variabil nu au o curgere echilibrată ceea ce duce la realizarea unei analize de curgere defectuoasă a acestor repere, analiză ce ține cont de configurația piesei respectiv tipul de injectare utilizat. Presiunea reprezintă un parametru foarte important în realizarea unei curgeri uniforme la piesele cu pereți subțiri în comparație cu piesele conventionale utilizate.

Pentru ca simulările de curgere realizate în CAE să ofere rezultate pozitive trebuie să se țină cont de următorii factori datele de intrare, parametrii specifici procesului, aplicația software utilizată, modelele numerice utilizate și caracteristicile reologice ale polimerului [BAR07], [CHA07]. Se dorește realizarea unor simulări de curgere destinate studiului din punct de vedere reologic pentru o serie de rețele de diverse configurații respectiv piese din diverse domenii în care principala caracteristică o reprezintă vâscozitatea materialului polimeric.

5.1.1. Studiu de caz

Piesa aleasă pentru studiu de caz (conform celor stabilite la cap. 4.7) având canale de curgere cu grosimea (interstițiu de curgere) de 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm și 0,6 mm este prezentată în figura 5.1.

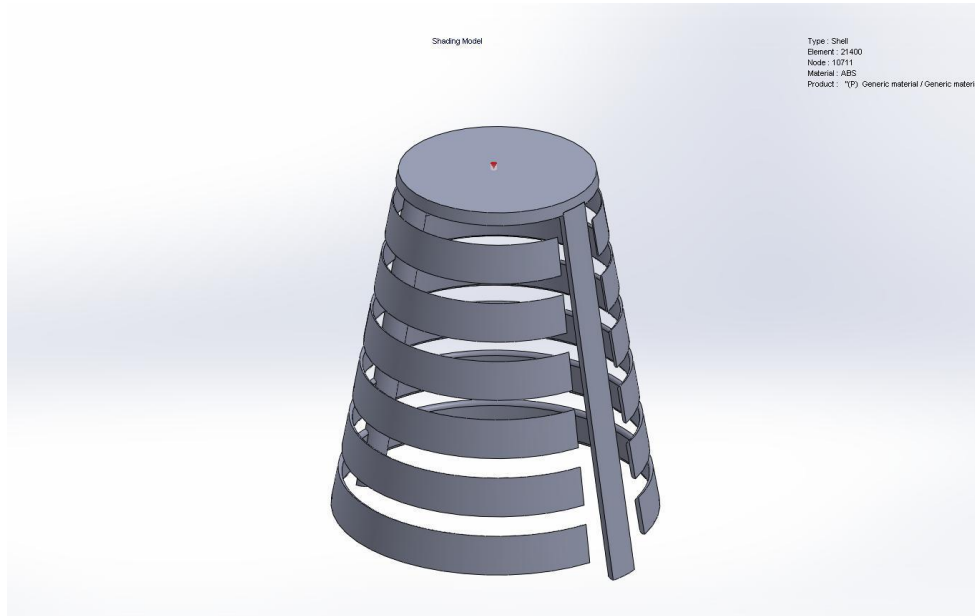


Figura 5.1. Modelul geometric al piesei de injectat

Încercările s-au făcut pentru următorii parametri de injectare:

Caz 1. $T_{inj} = 230 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_{inj} = 200 \text{ MPa}$ (2000 bar);

Caz 2. $T_{inj} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_{inj} = 200 \text{ MPa}$ (2000 bar).

Cazul 1

$T_{inj} = 230 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_{inj} = 200 \text{ MPa}$ (2000 bar);

a). Material ABS având următoarele caracteristici:

Product Name = "(P) Generic material / Generic material of ABS"

Melt Temperature = 230.00 °C

Mold Temperature = 50.00 °C

Eject Temperature = 90.00 °C

Glass Transition Temperature = 100.00 °C

Specific Heat = 1 2.4000000000e+007

Conductivity = 1 1.8000000000e+004

Young Modulus = 22.2500000000e+010 2.2500000000e+010

Poisson Ratio = 23.9000000000e-001 3.9000000000e-001

b). Parametrii de injectare – condiții de injectare (injectare/răcire):

FLOW/PACK

Filling Time = 0.16 sec

Main Material Melt Temperature = 230 °C

Mold Wall Temperature = 50 °C

Max. Inject (Machine) Pressure = 200 MPa

Max. Inject (Machine) Flow Rate = 400 cc/s

Flow/Pack Switch Point in Filled Volume = 100 %

Pressure Holding Time = 1.49 sec

Total Time in Pack Stage = 5.65 sec

Auto Fill Time(1: Exist, 0: Not) = 1

Auto Pack Time(1: Exist, 0: Not) = 1

COOL

Inlet melt temperature = 230 °C

Min. Coolant temperature = 25 °C

Air temperature = 30 °C

Mold open time = 5 sec

Average coolant flow rate = 150 cc/s

Control type(1:Eject temp., 2:Cooling time) = 1

Eject temperature(If control type is "1") = 120 °C

Cooling time(If control type is "2") = 5.65 sec

WARP

Ambient Temperature = 30 °C

c). Comportamentul reologic al materialului

În diagrama din figura 5.2 sunt prezentate proprietatile reologice ale ABS-lui, mai exact viteza de deformare în funcție de vâscozitatea materialului. Din punct de vedere reologic, la temperatura constantă, cu cât viteza de deformare este mai mare cu atât vâscozitatea materialului este mai ridicată.

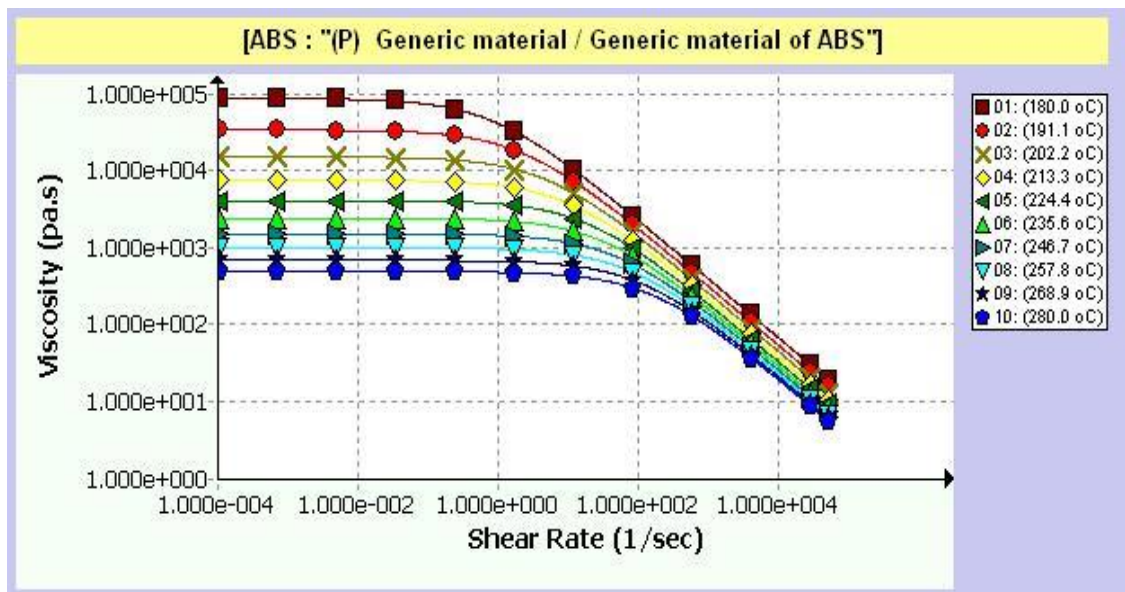


Figura 5.2. Proprietățile reologice ale ABS-lui

În figura 5.3 este prezentată diagrama PVT pentru materialul ABS.

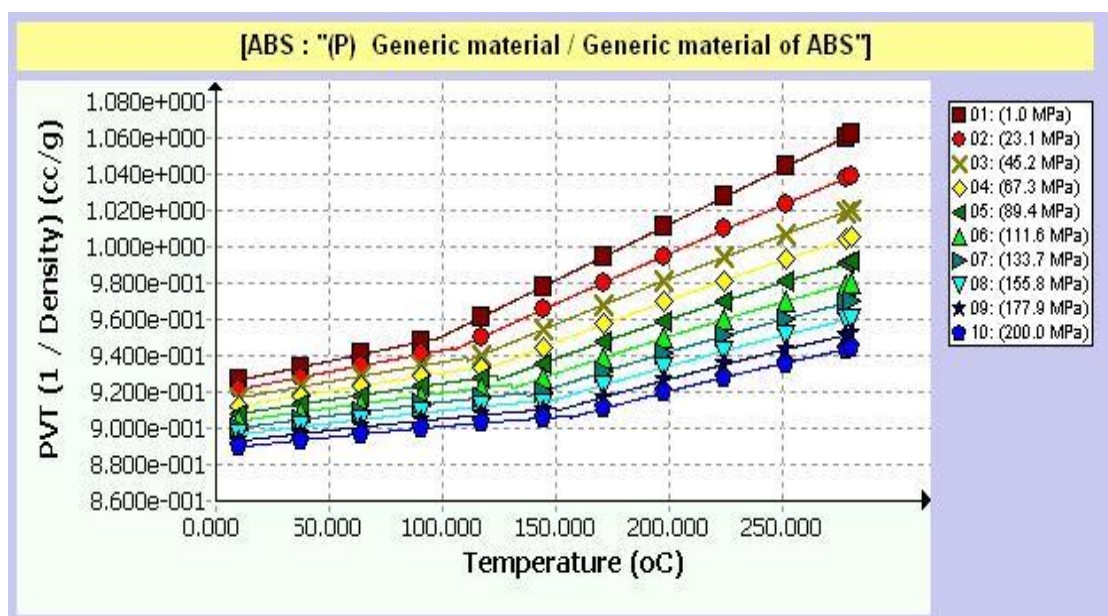


Figura 5.3. Diagrama PVT pentru ABS

Analizând diagrama din figura 5.3 putem spune ca odată cu creșterea temperaturii de procesare avem și o creștere a volumului specific injectat. Se remarcă faptul că volumul de material crește lent până în jurul temperaturii de 160-170 °C urmată de o creștere rapidă a acestuia.

d). Rezultatele simulării

În urma simulării se observă că timpul de injectare este de 0.16 secunde. În figura 5.4 a și b sunt prezentate secvențe din timpul simulării, aceasta evedețiind faptul că în cazul canalelor de curgere de grosime redusă umplerea nu se face complet.

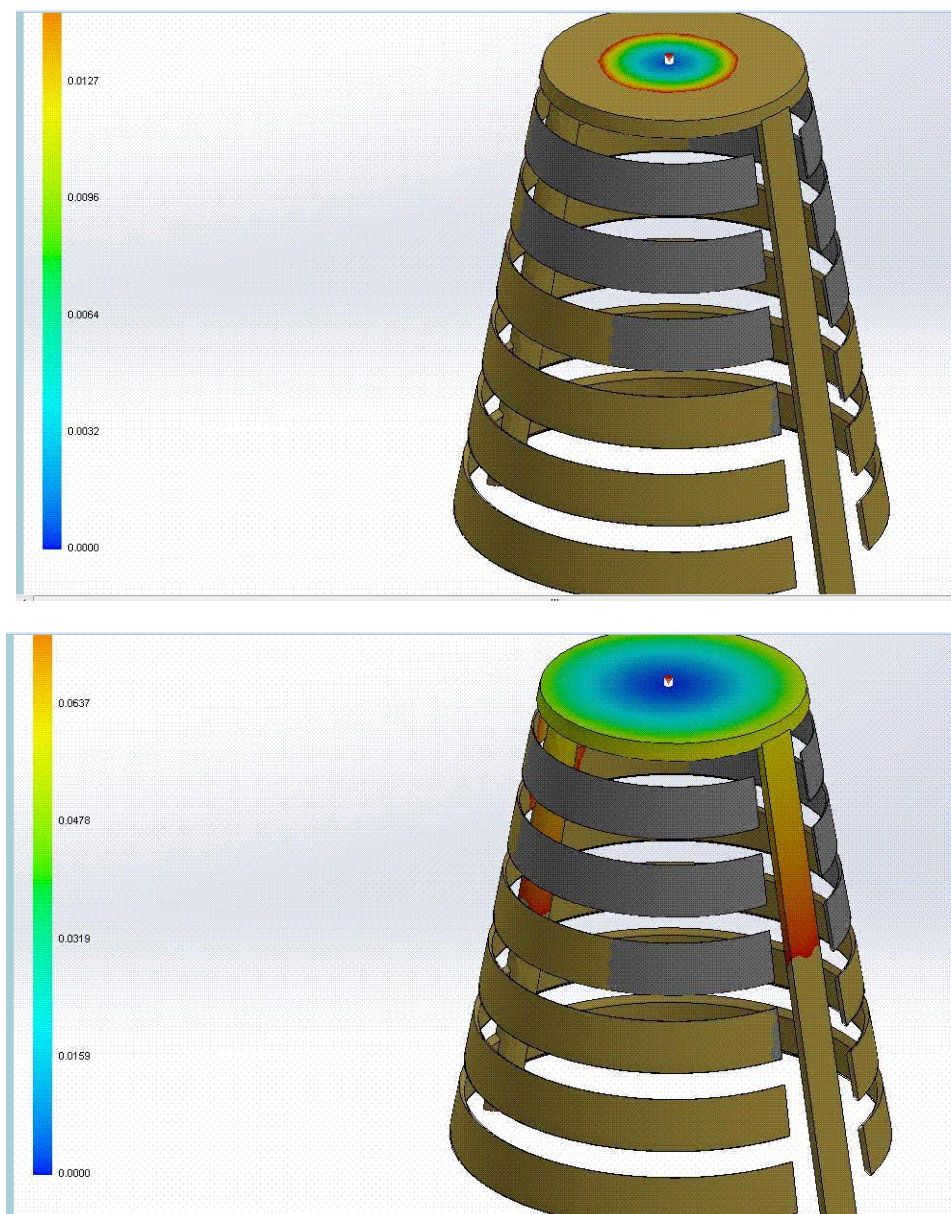


Figura 5.4.a. Secvențe din timpul simulării

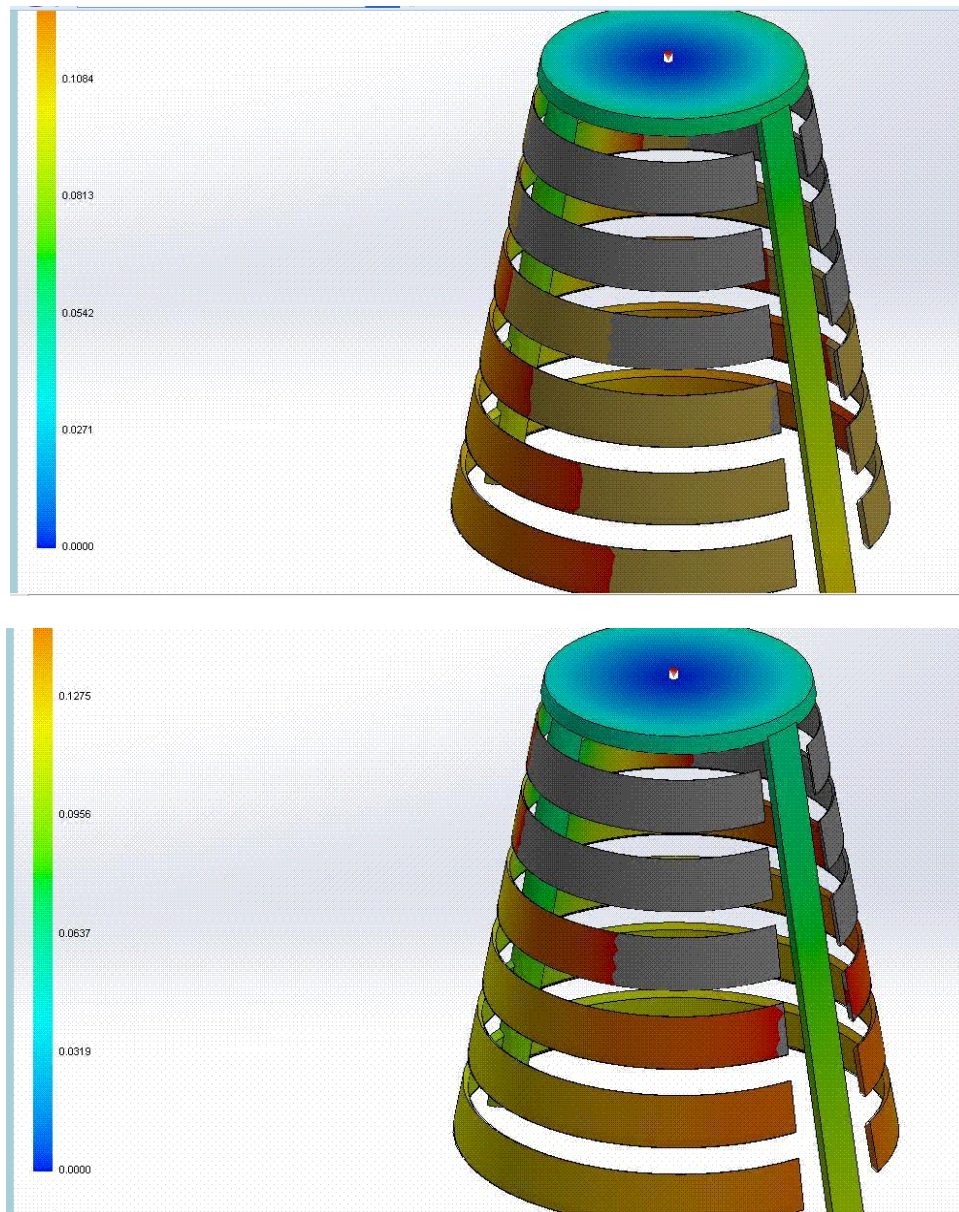


Figura 5.4.b. Secvențe din timpul simulării

Cazul 2

Tinj = 280 °C Pinj = 200 MPa (2000 bar);

a). Material ABS – vezi caz 1

b). Parametrii de injectare – condiții de injectare (injectare/răcire):

FLOW/PACK

Filling Time = 0.17 sec

Main Material Melt Temperature = 280 °C

Mold Wall Temperature = 80 °C

Max. Inject (Machine) Pressure = 200 MPa

Max. Inject (Machine) Flow Rate = 400 cc/s
 Flow/Pack Switch Point in Filled Volume = 100 %
 Pressure Holding Time = 1.49 sec
 Total Time in Pack Stage = 5.65 sec
 Auto Fill Time(1: Exist, 0: Not) = 1
 Auto Pack Time(1: Exist, 0: Not) = 1

COOL

Inlet melt temperature = 280 °C
 Min. Coolant temperature = 25 °C
 Air temperature = 30 °C
 Mold open time = 5 sec
 Average coolant flow rate = 150 cc/s
 Control type (1:Eject temp., 2:Cooling time) = 1
 Eject temperature(If control type is "1") = 90 °C
 Cooling time(If control type is "2") = 5.65 sec

WARP

Ambient Temperature = 30 °C

c). Comportamentul reologic al materialului

În diagrama din figura 5.5. sunt prezentate proprietățile reologice ale ABS-lui, mai exact viteza de deformare în funcție de vâscozitatea materialului. Din punct de vedere reologic, la o temperatură constantă, cu cât viteza de deformare este mai mare cu atât vâscozitatea materialului este mai ridicată.

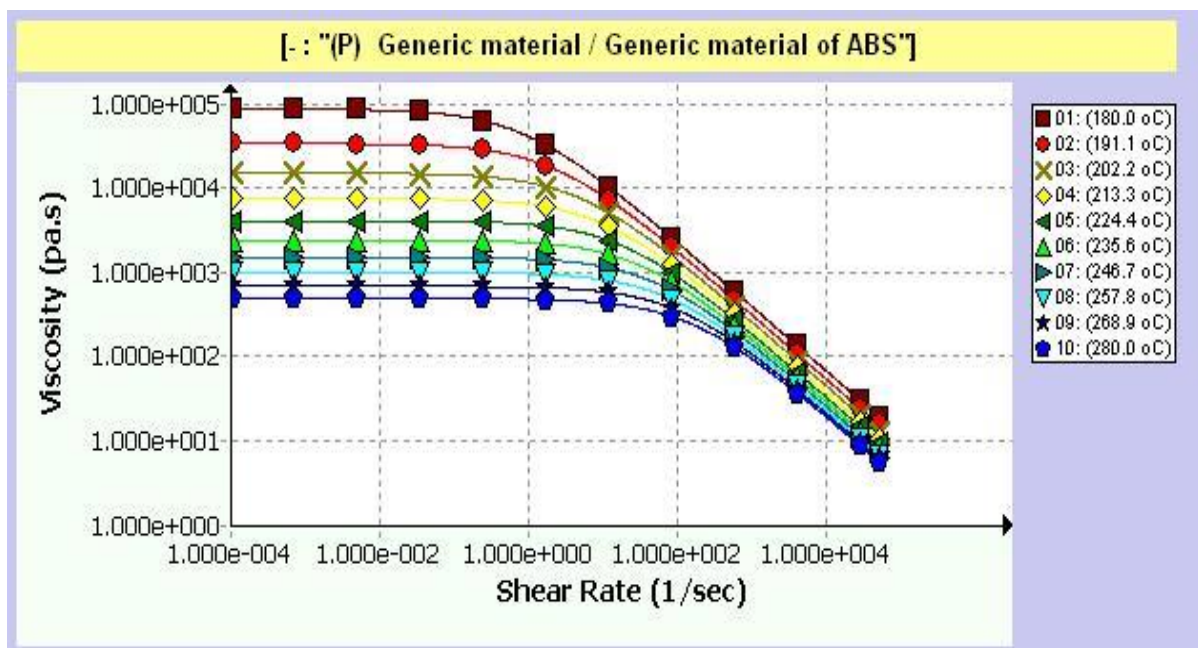


Figura 5.5. Proprietățile reologice ale ABS-lui

În figura 5.6. este prezentată diagrama PVT pentru materialul ABS.

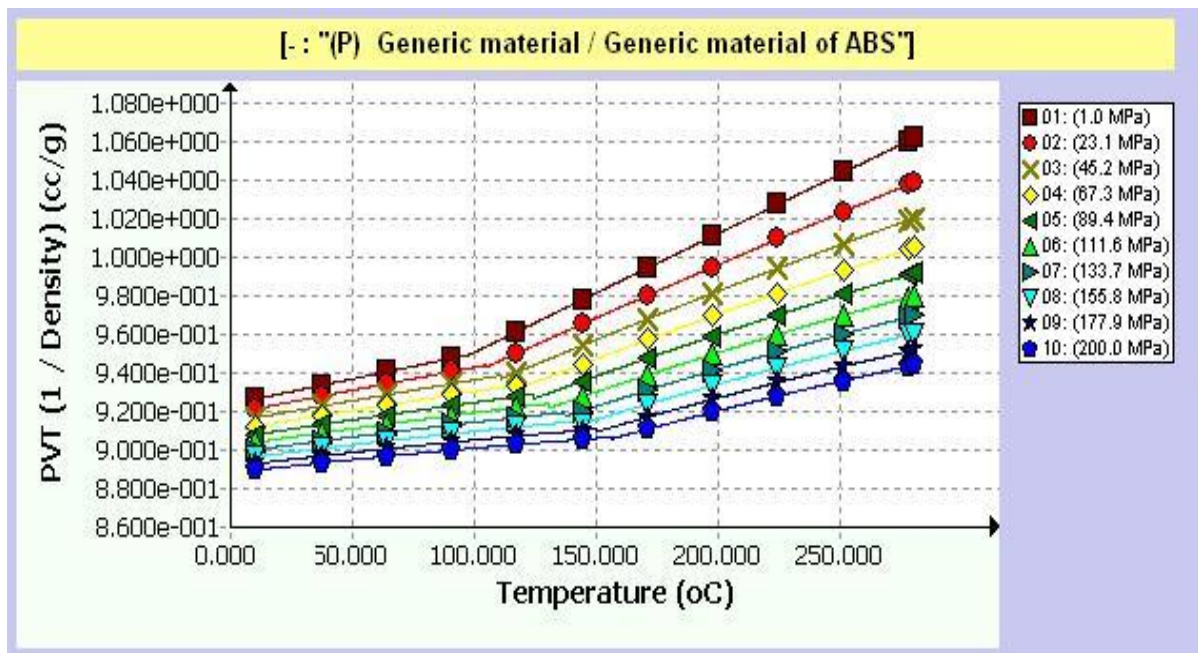


Figura 5.6. Diagrama PVT pentru ABS

Analizând diagrama din figura 5.6 putem spune că odată cu creșterea temperaturii de procesare avem și o creștere a volumului specific injectat. Se remarcă faptul că volumul de material crește lent până în jurul temperaturii de 160-170 °C urmată de o creștere rapidă a acestuia.

d). Rezultatul simulării

În urma simulării se observă că timpul de injectare este de 0.17 secunde. În figura 5.7 sunt prezentate secvențe din timpul simulării, aceasta evidențând faptul că în cazul canalelor de curgere de grosime redusă, umplerea nu se face complet.

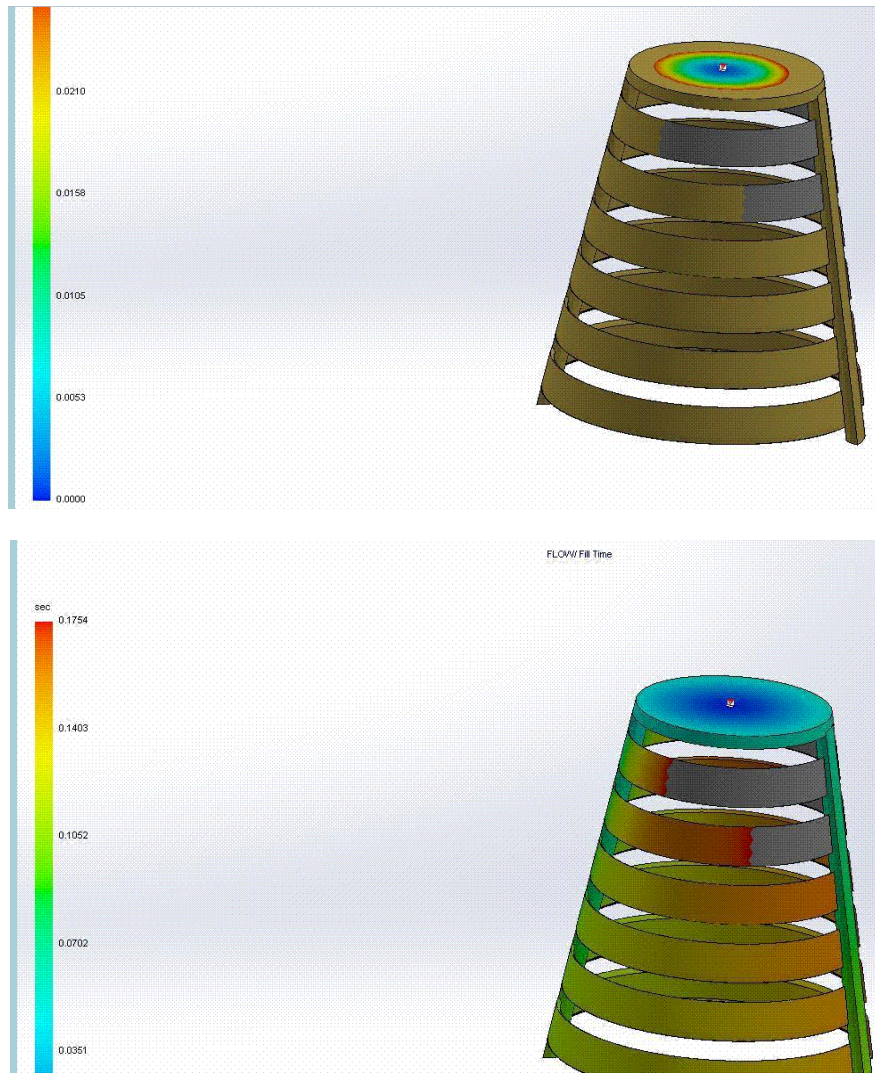


Figura 5.7. Simularea injectării

În concluzie putem spune că o dată cu creșterea temperaturii de injectare crește și timpul de injectare.

În ambele cazuri, umplerea piesei este incompletă, dar pentru temperatura de 280°C (T_{\max}) inclusiv calea de curgere de interstițiu $i=0,4$ mm este umplută complet.

5.2. Rezultate experimentale obținute

Materialul folosit la încercări a fost ABS, conform celor stabilite la cap.4.6.

Încercările au fost efectuate pe matrița de injectare (Figura 5.8) care a fost montată pe mașina de injectare Krauss Maffei KM 200-700 C1 (Figura 5.2). Pentru parametrii de influență de presiune și de temperatură de injectare, reglajul mașinii de injectare s-a făcut la valorile indicate în Tabelul 4.4.2.

La piesele injectate obținute în urma încercărilor experimentale (Figura 5.10) s-a măsurat lungimea parcursă de materialul plastic de-a lungul spațiului liber de curgere (interstițiu) dintre poanson (Figura 5.4) și cavitatea cuibului, pe ramurile de interstițiu $i = 0,2 \dots 0,5$ mm, conform recomandărilor de la cap. 4.7.



Figura 5.8. Matrița de injectare



Figura 5.9. Mașina de injectare Krauss Maffei



Figura 5.10. Piese obținute pentru diverse combinații p-T

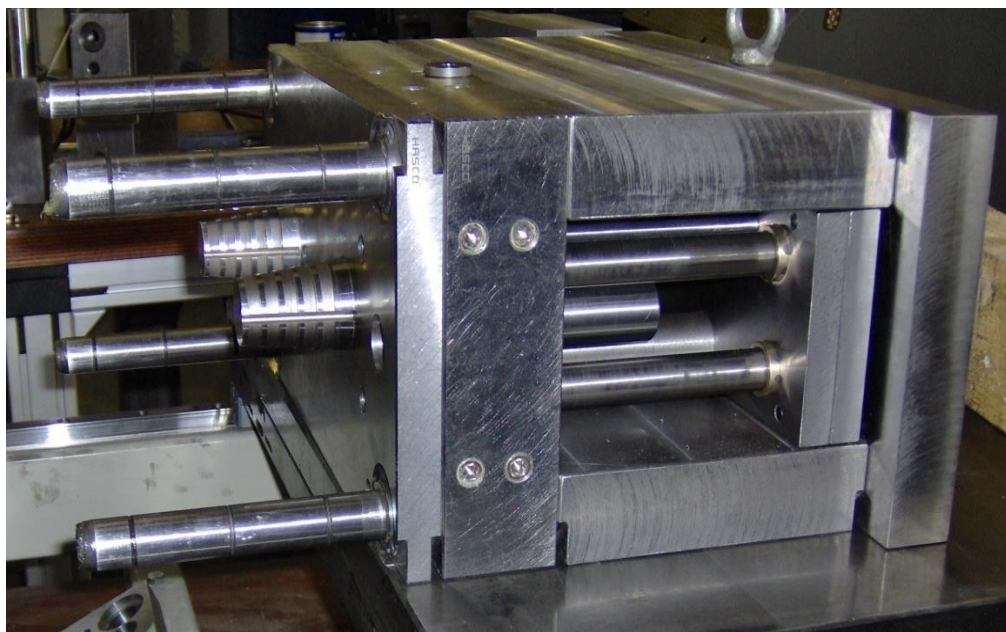


Figura 5.11. Semi-matriță mobilă

5.2.1. Rezultate experimentale la injectarea fără activarea duzei

Rezultatele experimentale obținute la injectarea fără activarea duzei în urma modificării celor 3 factori de influență (presiune, temperatură, interstițiu) sunt prezentate în Tabelul 5.1.

Tabelul 5.1 Rezultate experimentale la injectarea fără activarea duzei

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)			Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Lungime parcursă [mm]
1	-1	-1	+1	26
2	-1	+1	-1	5
3	-1	+1	+1	38
4	+1	+1	+1	47
5	+1	+1	-1	8
6	+1	-1	+1	30
7	-1	-1	-1	0
8	+1	-1	-1	1

5.2.2. Rezultate experimentale la injectarea cu activarea duzei

În Tabelul 5.2 sunt prezentate rezultatele experimentale obținute la injectarea cu activarea cu ultrasunete a duzei.

Tabelul 5.2. Rezultate experimentale la injectarea cu activarea duzei

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)				Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Activare US [-1=NU; +1=DA]	Lungime parcursă [mm]
1	+1	+1	+1	-1	47
2	+1	-1	+1	+1	38
3	+1	+1	+1	+1	52
4	+1	+1	-1	-1	8
5	-1	+1	-1	+1	17
6	-1	+1	+1	-1	38
7	-1	-1	+1	-1	26
8	-1	-1	-1	-1	0
9	-1	-1	-1	+1	8
10	-1	1	-1	-1	5
11	+1	-1	-1	+1	11
12	+1	-1	+1	-1	30
13	-1	+1	+1	+1	46
14	+1	+1	-1	+1	20
15	-1	-1	+1	+1	31
16	+1	-1	-1	-1	1

5.2.3. Rezultate experimentale la injectarea fără activarea poansonului-cuibului

În Tabelul 5.3 sunt prezentate rezultatele experimentale obținute la injectarea fără activarea poansonului în urma modificării celor 3 factori de influență (presiune, temperatură, interstițiu).

Tabelul 5.3 Rezultate experimentale la injectarea fără activarea poansonului-cuibului

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)			Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Lungime parcursă [mm]
1	-1	+1	+1	32
2	+1	-1	-1	2
3	-1	-1	-1	0
4	-1	-1	+1	21
5	-1	+1	-1	5
6	+1	-1	+1	26
7	+1	+1	+1	41
8	+1	+1	-1	10

5.2.4. Rezultate experimentale cu activarea ultrasonică poansonului-cuibului

În Tabelul 5.4 sunt prezentate rezultatele experimentale obținute la injectarea cu activarea cu ultrasunete a poansonului.

Tabelul 5.4 Rezultate experimentale la injectarea cu activarea poansonului-cuibului

Nr. exp.	Conținutul experimentului (codificat)				Răspuns măsurat
	Presiune [bar]	Temperatură [C]	Interstițiu [mm]	Activare US [-1=NU; +1=DA]	Lungime parcursă [mm]
1	+1	-1	+1	+1	30
2	+1	+1	+1	+1	43
3	+1	-1	-1	-1	2
4	-1	+1	+1	-1	32
5	-1	-1	-1	-1	0
6	-1	-1	+1	+1	24
7	-1	+1	-1	-1	5
8	+1	-1	+1	-1	26
9	-1	+1	+1	+1	36
10	-1	+1	-1	+1	14
11	-1	-1	+1	-1	21
12	+1	-1	-1	+1	7
13	-1	-1	-1	+1	6
14	+1	+1	-1	-1	10
15	+1	+1	+1	-1	41
16	+1	+1	-1	+1	18

5.3. Analiza și interpretarea rezultatelor experimentale

5.3.1. Injectarea fără activarea duzei

La prelucrarea statistică, cu ajutorul programului “Statgraphics”, a răspunsului celor trei factori principali (presiune, temperatură și interstițiu) privind lungimea parcursă de materialul plastic, Tabel 5.1, au fost determinate efectele estimate pentru factorii de influență și interacțiunile lor. Valorile efectelor estimate sunt prezentate în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5. Efectele estimate pentru “Lungime parcursă”

<i>Effect</i>	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>V.I.F.</i>
average	19,375	0,375	
A:Presiune	4,25	0,75	1,0
B:Temperatură	10,25	0,75	1,0
C:Interstitiu	31,75	0,75	1,0
AB	1,75	0,75	1,0
AC	2,25	0,75	1,0
BC	4,25	0,75	1,0

Standard errors are based on total error with 1 d.f.

Pentru reprezentarea grafică în ordine descrescătoare a importanței factorilor de influență și a interacțiunilor lor a fost utilizată diagrama Pareto, prezentată în figura 5.12.

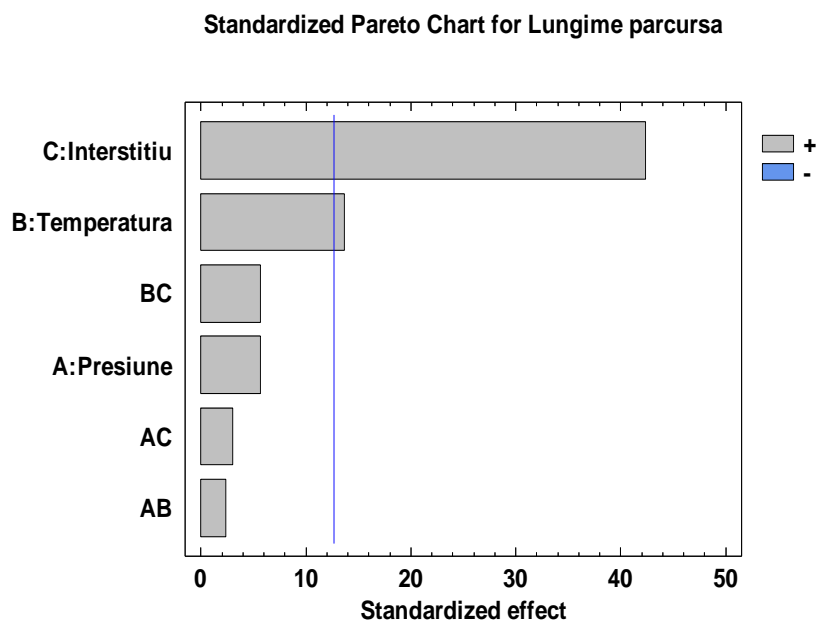


Figura 5.12 Diagrama Pareto pentru „Lungime parcursă”, D: $2^3 /i+T+p/$

Pentru a testa semnificația statistică a efectelor a fost utilizată analiza dispersională, de varianță ANOVA. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 5.2. În studiu fiind luați cei trei factori principali codificați cu A, B și C, precum și interacțiunile de ordinul doi care sunt produsele AB, AC, BC a factorilor principali.

Tabelul 5.6 ANOVA pentru “Lungime parcursă”

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Presiune	36,125	1	36,125	32,11	0,1112
B:Temperatură	210,125	1	210,125	186,78	0,0465
C:Interstițiu	2016,13	1	2016,13	1792,11	0,0150
AB	6,125	1	6,125	5,44	0,2578
AC	10,125	1	10,125	9,00	0,2048
BC	36,125	1	36,125	32,11	0,1112
Total error	1,125	1	1,125		
Total (corr.)	2315,88	7			

R-squared = 99,9514 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,66 percent

Standard Error of Est. = 1,06066

Mean absolute error = 0,375

Durbin-Watson statistic = 2,0

Lag 1 residual autocorrelation = -0,125

Programul determină, pentru fiecare efect în parte, valoarea criteriului Fisher, o compară cu cea tabelată, iar în final stabilește pragul de semnificație pentru care factorul respectiv are o influență semnificativă. Pentru un prag de semnificație $P \leq 0.05$, la un nivel de încredere de 95%, se constată că interstițiul și temperatura au o influență semnificativă asupra lungimii parcurse de materialul plastic. De altfel ponderea în influențarea lungimii parcurse se poate observa și în diagrama Pareto (figura 5.12), unde linia verticală, reprezentată pentru $P=0.05$, are rolul de a separa factorii semnificativi de ceilalți. Un alt indicator prezentat în tabelul 5.6 este R-pătrat înainte și după o ajustare a lui, având valori de 99,9514%, respectiv 99,66% (valori apropiate de 100%), lucru care arată că modelarea matematică a fenomenului este foarte bună. Aceasta se poate vedea (figura 5.13) și din dispersia valorilor rezidualilor obținute experimental față de valorile estimate de modelul matematic. Faptul că dispersia acestora este aleatoare și nu se observă o dispunere sistematică, ne dovedește că modelul matematic nu a introdus erori sistematice și nici în timpul experimentărilor nu au fost astfel de erori.

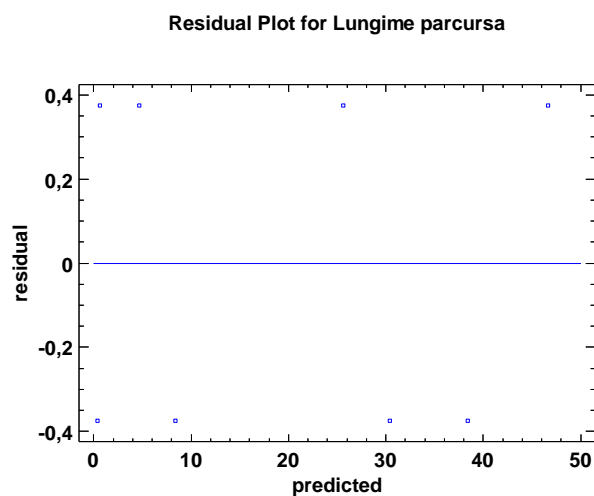


Figura 5.13 Diagrama rezidualilor

În tabelul 5.7. sunt prezentate valorile coeficienților de regresie pentru lungimea parcursă de materialul plastic. Pe baza acestor coeficienți se poate determina expresia modelului matematic.

Tabelul 5.7. Coeficienți de regresie pentru „Lungime parcursă”

<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	19,375
A:Presiune	2,125
B:Temperatură	5,125
C:Interstițiu	15,875
AB	0,875
AC	1,125
BC	2,125

Model matematic:

$$Lungime\ parcursă = 19,375 + 2,125 * P + 5,125 * T + 15,875 * I + 0,875 * P * T + 1,125 * P * I + 2,125 * T * I$$

În figura 5.14. sunt reprezentate efectele principale pentru funcția de răspuns: lungime parcursă. Se observă că atât cei trei factori de influență cât și interacțiunile lor, conduc la creșterea lungimii parcurse prin mărirea valorii lor de la minim la maxim.

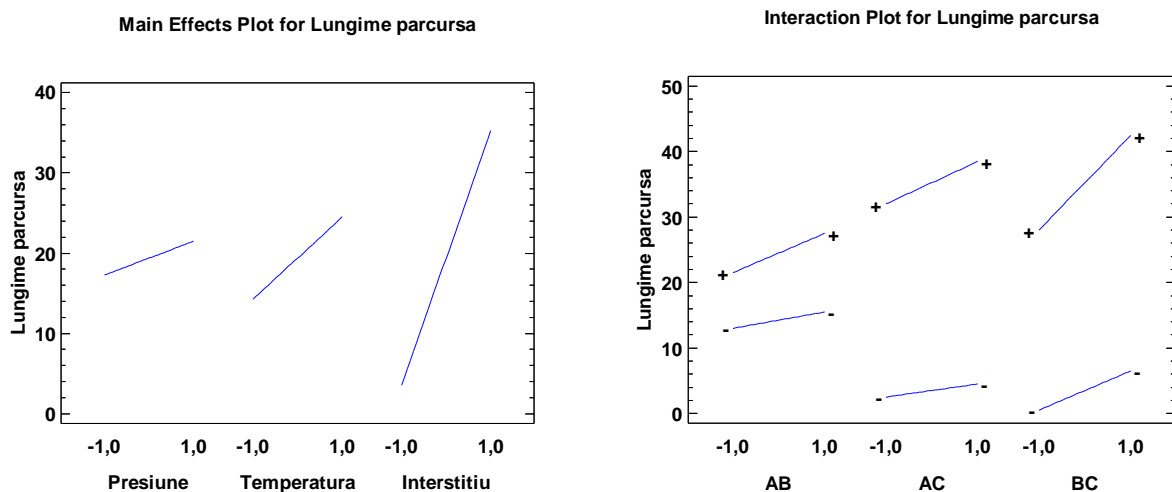


Figura 5.14. Efecte principale pentru „Lungime parcursă”

În figura 5.15., figura 5.16. și figura 5.17 este reprezentată variația în spațiu, sub formă de suprafață (a), sau în plan, sub formă de contururi obținute prin secționarea suprafeței de răspuns (b), a lungimii parcurse de materialul plastic în funcție de combinațiile dintre cei 3 factori de influență.

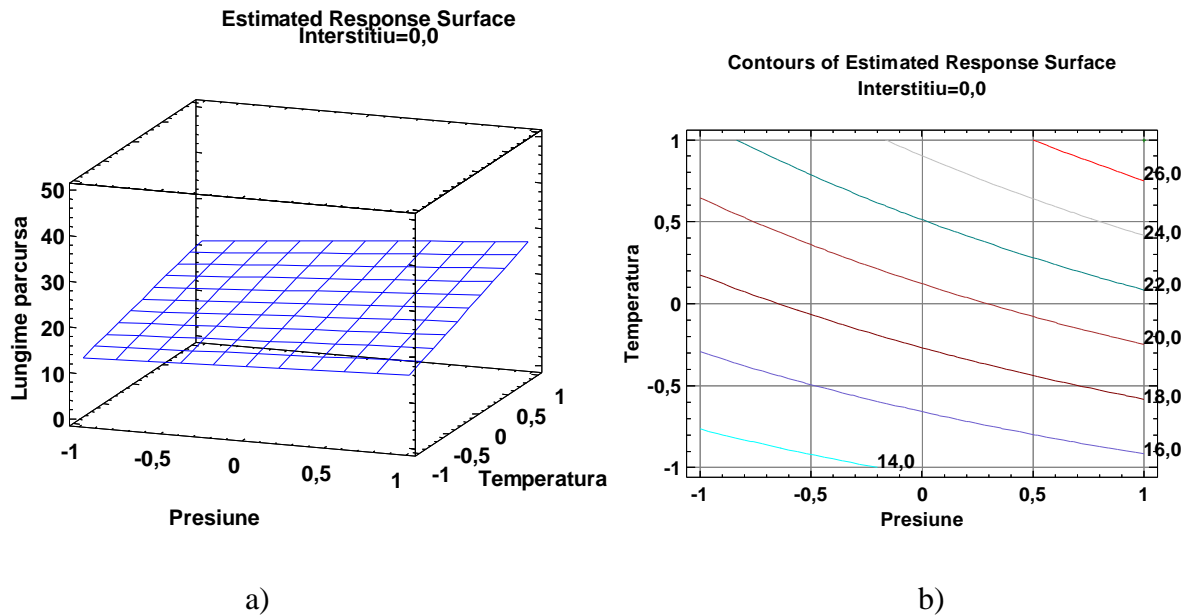


Figura 5.15. Influența presiunii și a temperaturii

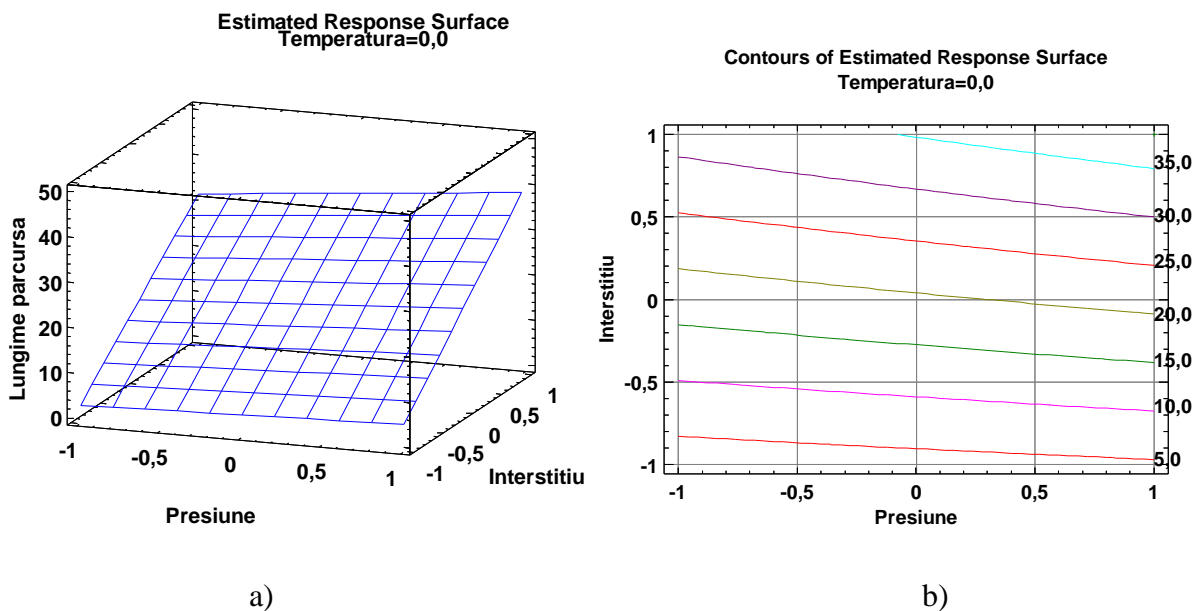


Figura 5.16. Influența presiunii și a interstițiului

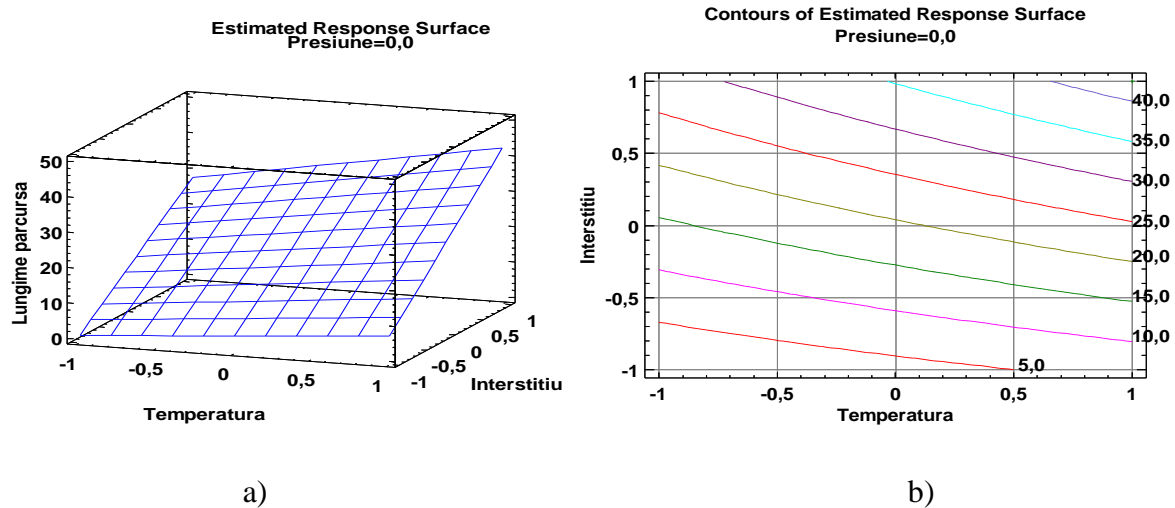


Figura 5.17. Influența temperaturii și a interstițiului

5.3.2. Injectarea cu activarea duzei

Experimentul s-a realizat prin modificarea valorilor celor 3 factori de influență (presiune, temperatură și interstițiu) și prin activarea cu ultrasunete a duzei de injectare. În urma prelucrării statistice a rezultatelor au fost determinate efectele estimate pentru factorii de influență și interacțiunile lor, valori prezentate în tabelul 5.8.

Tabelul 5.8. Efectele estimate pentru "Lungime parcursă"

<i>Effect</i>	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>V.I.F.</i>
Media	23,625	0,311247	
A:Presiune	4,5	0,622495	1,0
B:Temperatură	11,0	0,622495	1,0
C:Interstițiu	29,75	0,622495	1,0
D:Activare US	8,5	0,622495	1,0
AB	0,75	0,622495	1,0
AC	2,0	0,622495	1,0
AD	0,25	0,622495	1,0
BC	3,5	0,622495	1,0
BD	0,75	0,622495	1,0
CD	-2,0	0,622495	1,0

Pentru reprezentarea grafică în ordine descrescătoare a importanței factorilor de influență și a interacțiunilor lor a fost utilizată diagrama Pareto, prezentată în figura 5.18.

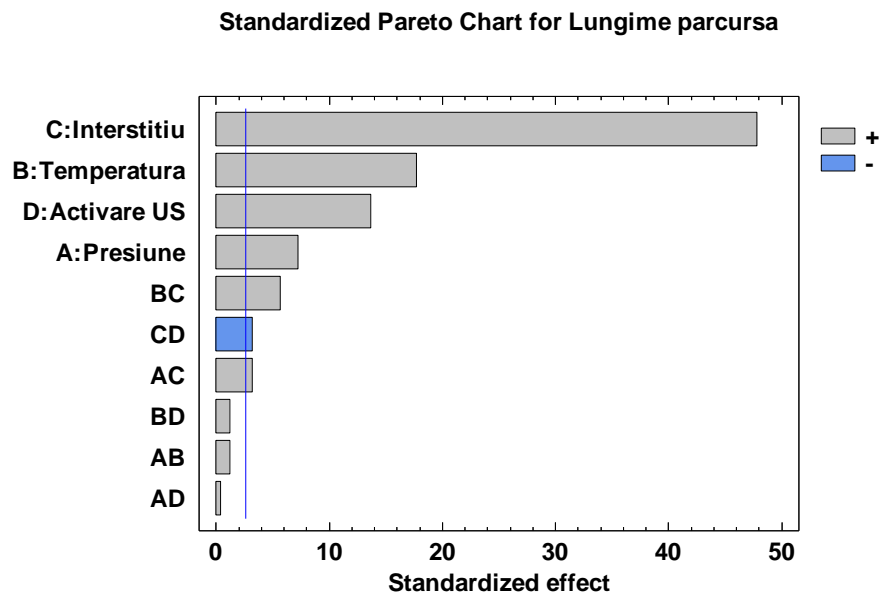


Figura 5.18 Diagrama Pareto pentru „Lungime parcursă”, $D: 2^4 /i+T+p+US/$

Pentru a testa semnificația statistică a efectelor a fost utilizată analiza de varianță - ANOVA. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 5.9., în studiu fiind luați cei 4 factori principali codificați cu A, B, C și D, precum și interacțiunile de ordinul doi care sunt produsele AB, AC, AD, BC, BD și CD a factorilor principali.

Pentru un prag de semnificație $P \leq 0.05$, la un nivel de încredere de 95%, se constată că 4 factori și 3 interacțiuni de ordinul doi ($P\text{-value} \leq 0.05$) au o influență semnificativă asupra lungimii parcurse de materialul plastic. De altfel ponderea în influențarea lungimii parcurse se poate observa și în diagrama Pareto (figura 5.18), unde linia verticală, reprezentată pentru $P=0.05$, are rolul de a separa factorii semnificativi de ceilalți. Un alt indicator prezentat în tabelul 5.9 este R-pătrat înainte și după o ajustare a lui, având valori de 99,8273 %, respectiv 99,4819 % (valori apropiate de 100%), lucru care arată că modelarea matematică a fenomenului este foarte bună. Aceasta se poate vedea (figura 5.19.) și din dispersia valorilor rezidualilor obținute experimental față de valorile estimate de modelul matematic. Faptul că dispersia acestora este aleatoare și nu se observă o dispunere sistematică, ne dovedește că modelul matematic nu a introdus erori sistematice și nici în timpul experimentărilor nu au fost astfel de erori.

Tabelul 5.9. ANOVA pentru "Lungime parcursă"

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
A:Presiune	81,0	1	81,0	52,26	0,0008
B:Temperatură	484,0	1	484,0	312,26	0,0000
C:Interstițiu	3540,25	1	3540,25	2284,03	0,0000
D:Activare US	289,0	1	289,0	186,45	0,0000
AB	2,25	1	2,25	1,45	0,2822
AC	16,0	1	16,0	10,32	0,0237
AD	0,25	1	0,25	0,16	0,7046
BC	49,0	1	49,0	31,61	0,0025
BD	2,25	1	2,25	1,45	0,2822
CD	16,0	1	16,0	10,32	0,0237
Total error	7,75	5	1,55		
Total (corr.)	4487,75	15			

R-squared = 99,8273 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,4819 percent

Standard Error of Est. = 1,24499

Mean absolute error = 0,578125

Durbin-Watson statistic = 1,95968 (P=0,5496)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,102823

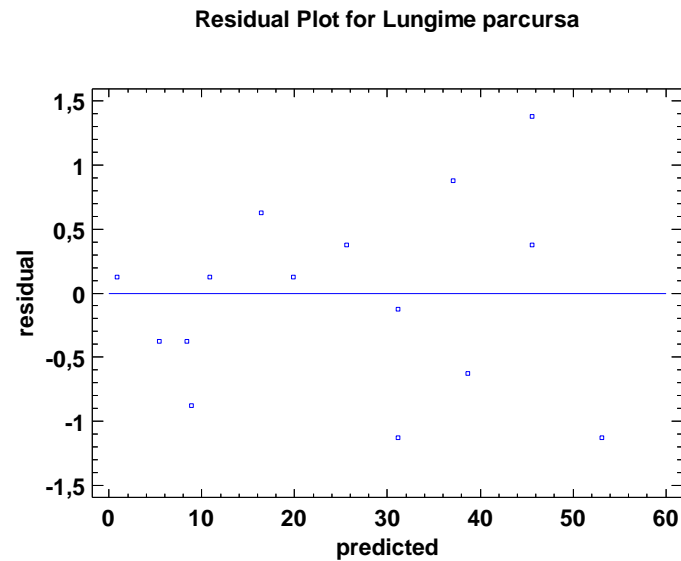


Figura 4.19. Diagrama rezidualilor

In tabelul 5.10 sunt prezentate valorile coeficienților de regresie pentru lungimea parcursă de materialul plastic. Pe baza acestor coeficienți se poate determina expresia modelului matematic.

Tabelul 5.10. Coeficienți de regresie pentru „Lungime parcursă”

<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	23,625
A:Presiune	2,25
B:Temperatură	5,5
C:Interstițiu	14,875
D:Activare US	4,25
AB	0,375
AC	1,0
AD	0,125
BC	1,75
BD	0,375
CD	-1,0

Model matematic:

$$Lungime\ parcursă = 23,625 + 2,25 * P + 5,5 * T + 14,875 * I + 4,25 * US + 0,375 * P * T + 1,0 * P * I + 0,125 * P * US + 1,75 * T * I + 0,375 * T * US - 1,0 * I * US$$

În figura 5.20. sunt reprezentate efectele principale pentru funcția de răspuns: lungime parcursă. Se observă că atât cei patru factori de influență cât și interacțiunile lor, conduc la creșterea lungimii parcurse prin mărirea valorii lor de la minim la maxim.

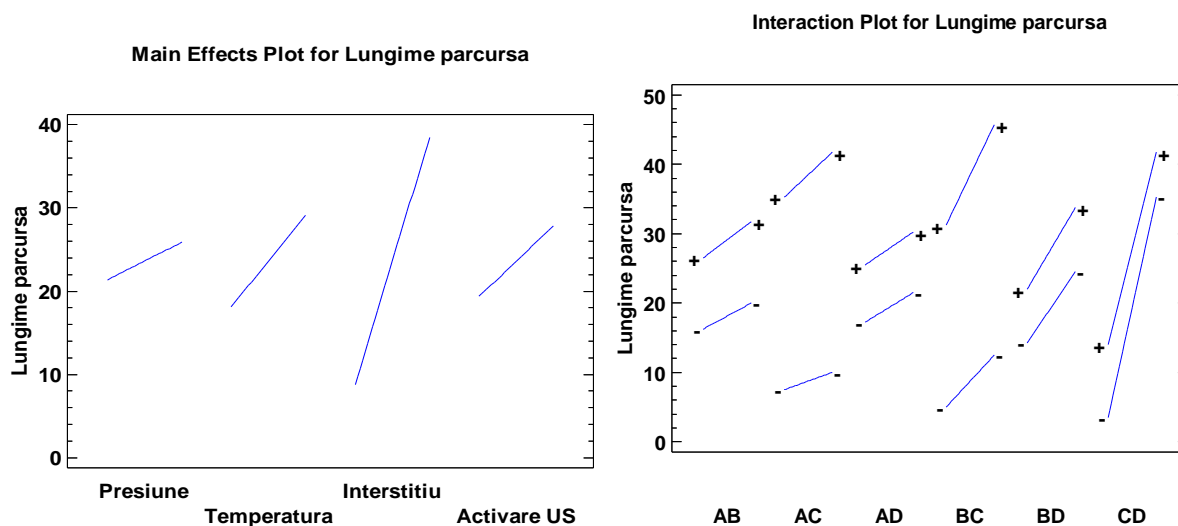


Figura 5.20 Efecte principale pentru „Lungime parcursă”

În figurile 5.21. până în figurile 5.26. sunt reprezentate variațiile în spațiu, sub formă de suprafață (a), sau în plan, sub formă de contururi obținute prin secționarea suprafeței de răspuns (b), a lungimii parcurse de materialul plastic în funcție de combinațiile dintre cei 4 factori de influență.

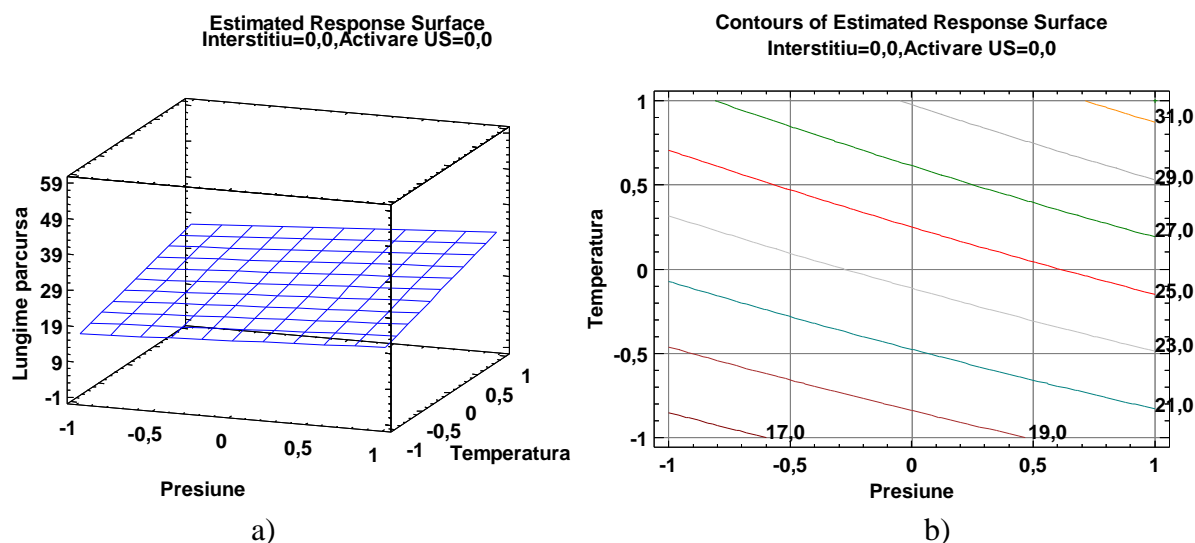
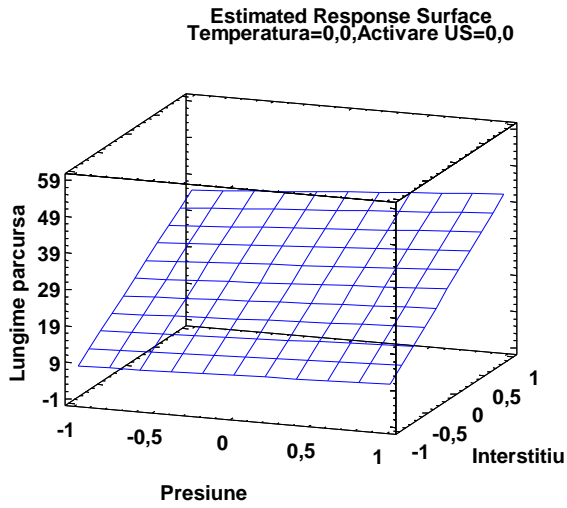
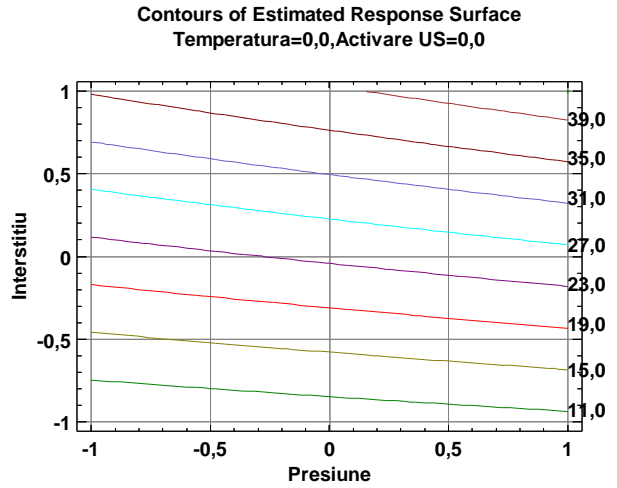


Figura 5.21. Influența presiunii și a temperaturii

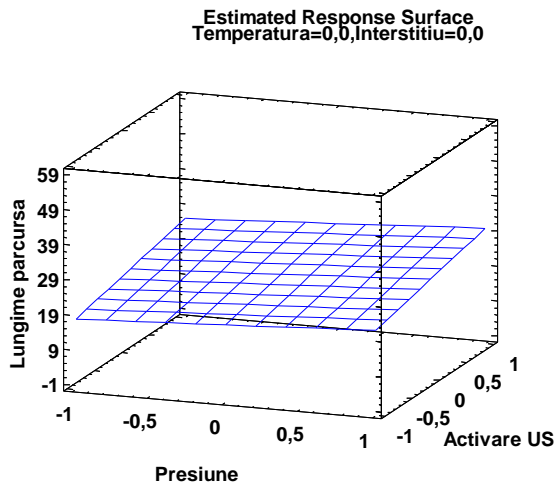


a)

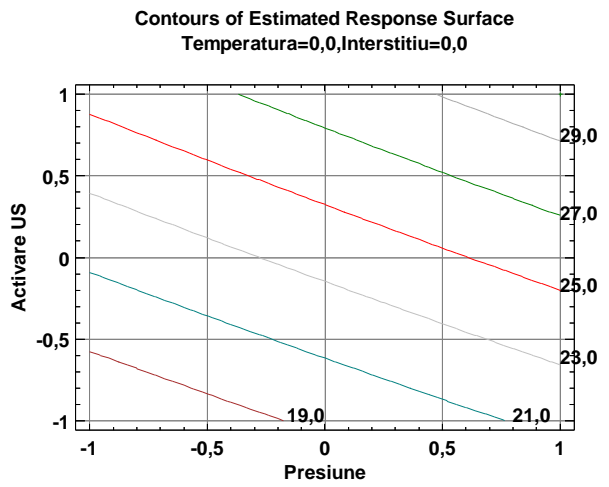


b)

Figura 5.22. Influența presiunii și a interstițiului

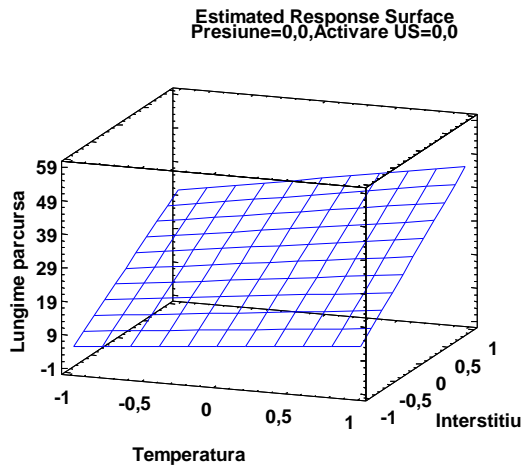


a)

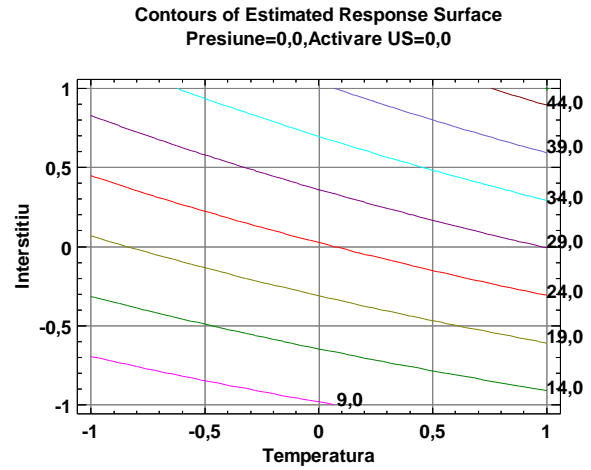


b)

Figura 5.23. Influența presiunii și a activării US

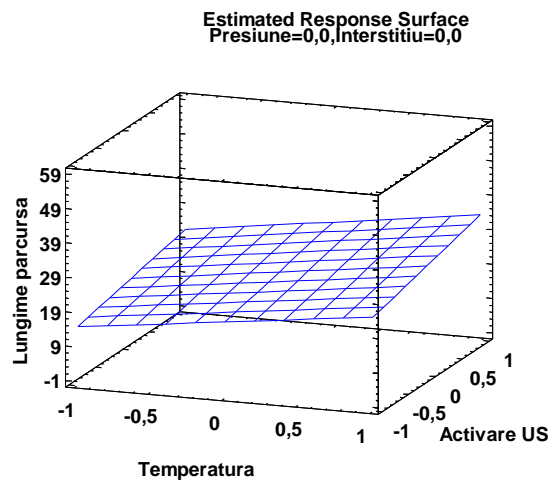


a)

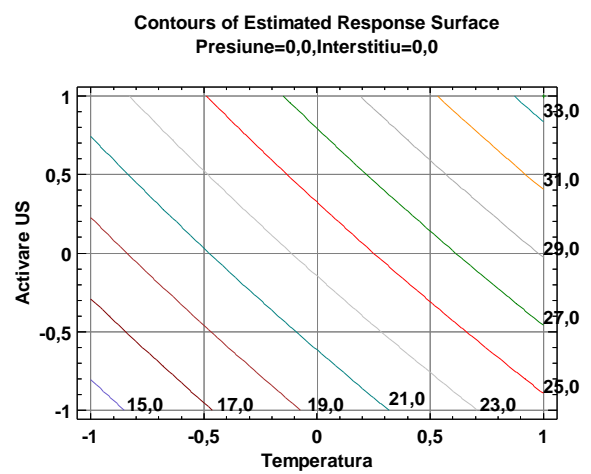


b)

Figura 5.24. Influența temperaturii și a interștiului



a)



b)

Figura 5.25. Influența temperaturii și a activării US

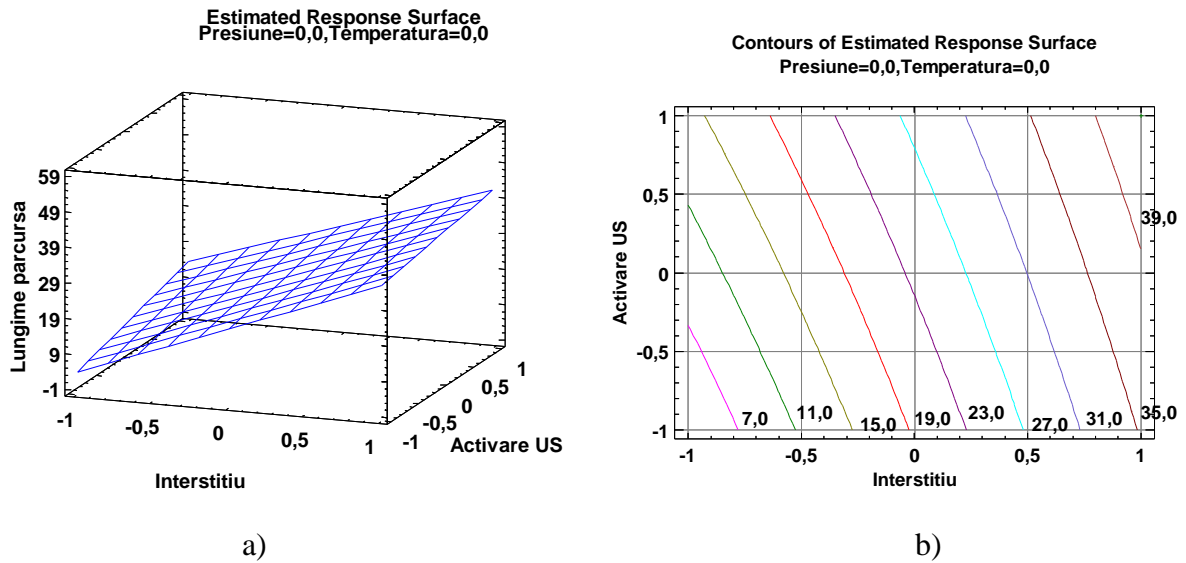


Figura 5.26. Influența interstițiului și a activării US

5.3.3. Injectarea fără activarea poansonului-cuibului

În tabelul 5.11. sunt prezentate efectele estimate pentru factorii de influență și interacțiunile lor.

Tabelul 5.11. Efectele estimate pentru "Lungime parcursă"

<i>Effect</i>	<i>Estimat e</i>	<i>Std. Error</i>	<i>V.I.F.</i>
average	17,125	0,125	
A:Presiune	5,25	0,25	1,0
B:Temperatură	9,75	0,25	1,0
C:Interstițiu	25,75	0,25	1,0
AB	1,75	0,25	1,0
AC	1,75	0,25	1,0
BC	3,25	0,25	1,0

Standard errors are based on total error with 1 d.f.

Pentru reprezentarea grafică în ordine descrescătoare a importanței factorilor de influență și a interacțiunilor lor a fost utilizată diagrama Pareto, prezentată în figura 5.27.

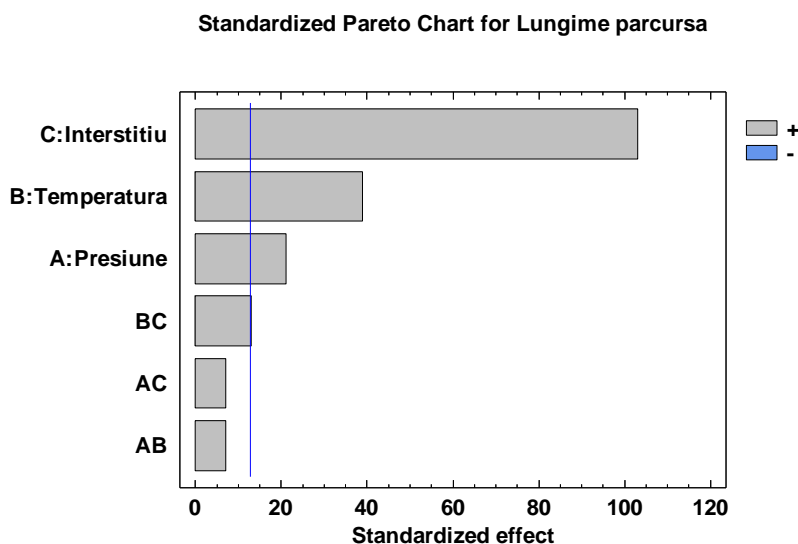


Figura 5.27. Diagrama Pareto pentru „Lungime parcursă”, $P : 2^3 / i+T+p/$

Pentru a testa semnificația statistică a efectelor a fost utilizată analiza dispersională, de varianță ANOVA. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 5.12., în studiu fiind luați cei trei factori principali codificați cu A, B și C, precum și interacțiunile de ordinul doi care sunt produsele AB, AC, BC a factorilor principali.

Tabelul 5.12. ANOVA pentru “Lungime parcursă”

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
A: Presiune	55,125	1	55,125	441,00	0,0303
B: Temperatură	190,125	1	190,125	1521,00	0,0163
C: Interstițiu	1326,13	1	1326,13	10609,0	0,0062
AB	6,125	1	6,125	49,00	0,0903
AC	6,125	1	6,125	49,00	0,0903
BC	21,125	1	21,125	169,00	0,0489
Total error	0,125	1	0,125		
Total (corr.)	1604,88	7			

R-squared = 99,9922 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,9455 percent

Standard Error of Est. = 0,353553

Mean absolute error = 0,125

Durbin-Watson statistic = 3,0

Lag 1 residual autocorrelation = -0,625

Pentru un prag de semnificație $P \leq 0.05$, la un nivel de încredere de 95%, se constată că cei 3 factori de influență cât și interacțiunea de ordinul doi BC au o influență semnificativă asupra lungimii parcurse de materialul plastic ($P\text{-Value} \leq 0.05$). De altfel ponderea în influențarea lungimii parcurse se poate observa și în diagrama Pareto (figura 5.27), unde linia verticală, reprezentată pentru $P=0.05$, separă factorii semnificativi de ceilalți. Un alt indicator prezentat în tabelul 5.12. este R-pătrat înainte și după o ajustare a lui, având valori de 99,9922 %, respectiv 99,9455% (valori apropiate de 100%), lucru care arată că modelarea matematică a fenomenului este foarte bună. Aceasta se poate vedea (figura 4.29.) și din dispersia valorilor rezidualilor obținute experimental față de valorile estimate de modelul matematic.

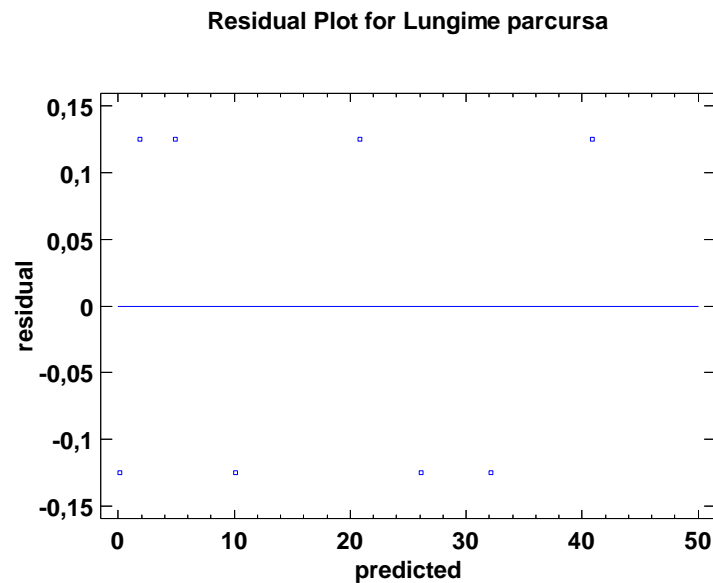


Figura 5.28. Diagrama rezidualilor

Valorile coeficienților de regresie pentru lungimea parcursă de materialul plastic sunt prezentate în tabelul 5.13. Pe baza acestor coeficienți se poate determina expresia modelului matematic.

Tabelul 5.13. Coeficienți de regresie pentru „Lungime parcursă”

<i>Coefficient</i>	<i>Estimat e</i>
constant	17,125
A: Presiune	2,625
B: Temperatură	4,875
C: Interstițiu	12,875
AB	0,875
AC	0,875
BC	1,625

Model matematic:

$$Lungime\ parcursă = 17,125 + 2,625 * P + 4,875 * T + 12,875 * I + 0,875 * P * T + 0,875 * P * I + 1,625 * T * I$$

În figura 5.29. sunt reprezentate efectele principale pentru funcția de răspuns: lungime parcursă. Se observă că atât cei trei factori de influență cât și interacțiunile lor, conduc la creșterea lungimii parcurse prin mărirea valorii lor de la minim la maxim.

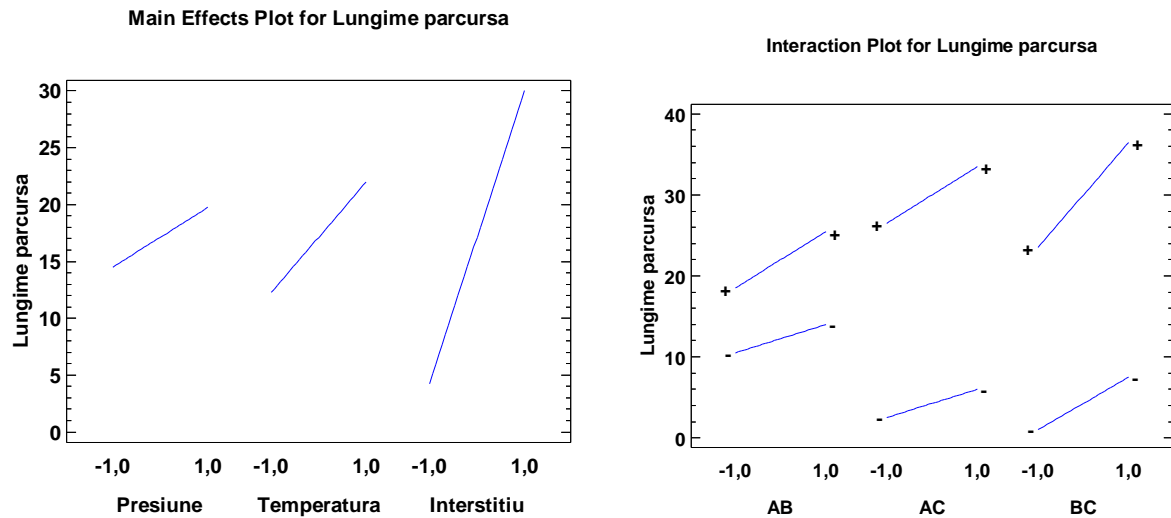
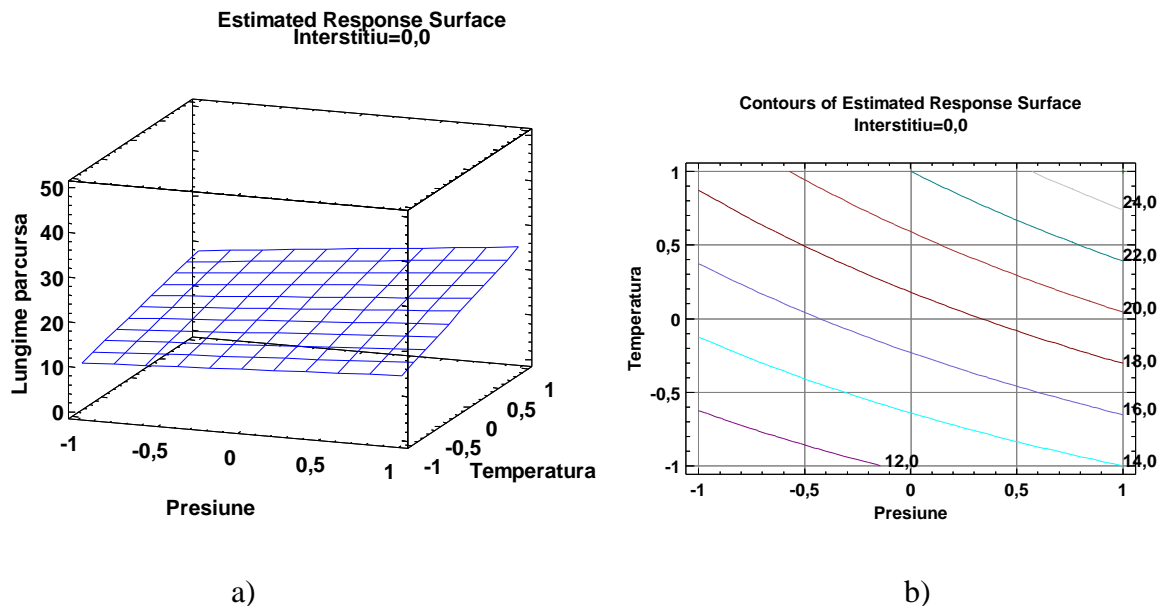


Figura 5.29. Efecte principale pentru „Lungime parcursă”

În figura 5.30, figura 5.31, figura 5.32 este reprezentată variația în spațiu, sub formă de suprafață (a), sau în plan, sub formă de contururi obținute prin secționarea suprafeței de răspuns (b), a lungimii parcurse de materialul plastic în funcție de combinațiile dintre cei 3 factori de influență.



a)

b)

Figura 5.30. Influența presiunii și a temperaturii

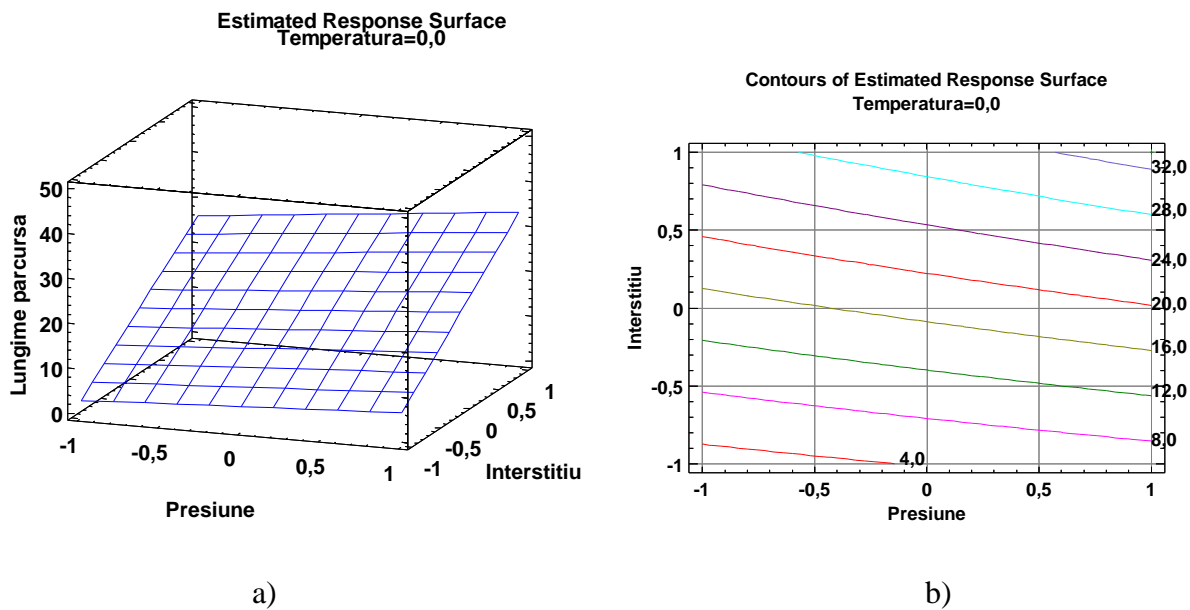


Figura 5.31. Influența presiunii și a interstițiului

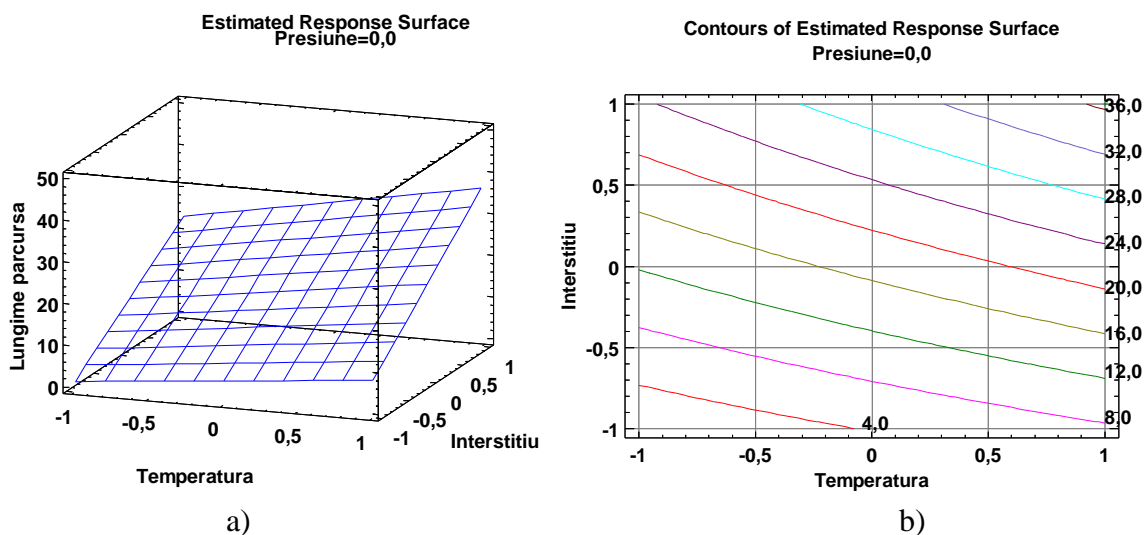


Figura 5.32. Influența temperaturii și a interstițiului

5.3.4. Injectarea cu activarea poansonului-cuibului

Experimentul s-a realizat prin modificarea valorilor celor 3 factori de influență (presiune, temperatură și interstițiu) coroborat cu activarea cu ultrasunete a duzei de injectare. În urma prelucrării statistice a rezultatelor au fost determinate efectele estimate pentru factorii de influență și interacțiunile lor, Tabelul 5.14.

Tabelul 5.14. Efectele estimate pentru "Lungime parcursă"

<i>Effect</i>	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>V.I.F.</i>
average	19,6875	0,232177	
A:Presiune	4,875	0,464354	1,0
B:Temperatură	10,375	0,464354	1,0
C:Interstițiu	23,875	0,464354	1,0
D:Activare US	5,125	0,464354	1,0
AB	1,375	0,464354	1,0
AC	1,875	0,464354	1,0
AD	-0,375	0,464354	1,0
BC	2,375	0,464354	1,0
BD	0,625	0,464354	1,0
CD	-1,875	0,464354	1,0

Standard errors are based on total error with 5 d.f.

Pentru reprezentarea grafică în ordine descrescătoare a importanței factorilor de influență și a interacțiunilor lor a fost utilizată diagrama Pareto, prezentată în figura 5.33.

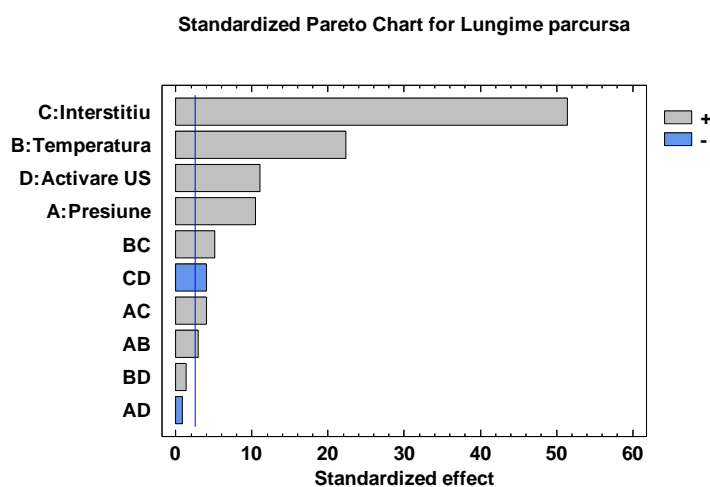


Figura 5.33. Diagrama Pareto pentru „Lungime parcursă”, $P: 2^4 / i+T+p+US/$

Pentru a testa semnificația statistică a efectelor a fost utilizată analiza dispersională, de varianță ANOVA. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 5.15, în studiu fiind luați cei 4 factori principali codificați cu A, B, C și D, precum și interacțiunile de ordinul doi care sunt produsele AB, AC, AD, BC, BD și CD a factorilor principali.

Tabelul 5.15. ANOVA pentru "Lungime parcursă"

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
A:Presiune	95,0625	1	95,0625	110,22	0,0001
B:Temperatură	430,563	1	430,563	499,20	0,0000
C:Interstițiu	2280,06	1	2280,06	2643,55	0,0000
D:Activare US	105,063	1	105,063	121,81	0,0001
AB	7,5625	1	7,5625	8,77	0,0315
AC	14,0625	1	14,0625	16,30	0,0099
AD	0,5625	1	0,5625	0,65	0,4560
BC	22,5625	1	22,5625	26,16	0,0037
BD	1,5625	1	1,5625	1,81	0,2361
CD	14,0625	1	14,0625	16,30	0,0099
Total error	4,3125	5	0,8625		
Total (corr.)	2975,44	15			

R-squared = 99,8551 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,5652 percent

Standard Error of Est. = 0,928709

Mean absolute error = 0,445313

Durbin-Watson statistic = 1,7971 (P=0,4020)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,0226449

Pentru un prag de semnificație $P \leq 0.05$, la un nivel de încredere de 95%, se constată că toți cei 4 factori de influență și alte 4 interacțiuni de ordinul doi au o influență semnificativă asupra lungimii parcurse de materialul plastic ($P\text{-Value} \leq 0.05$). Ponderea în influențarea lungimii parcurse se poate observa și în diagrama Pareto (figura 5.33.), unde linia verticală, reprezentată pentru $P=0.05$, separă factorii semnificativi de ceilalți. Un alt indicator prezentat în tabelul 5.14. este R-pătrat înainte și după o ajustare a lui, având valori de 99,8551 %, respectiv 99,5652 % (valori apropiate de 100%), lucru care arată că modelarea matematică a fenomenului este foarte bună. Aceasta se poate vedea (figura 5.34) și din dispersia valorilor rezidualilor obținute experimental față de valorile estimate de modelul matematic. Faptul că dispersia acestora este aleatoare și nu se observă o dispunere sistematică, ne dovedește că modelul matematic nu a introdus erori sistematice și nici în timpul experimentărilor nu au fost astfel de erori.

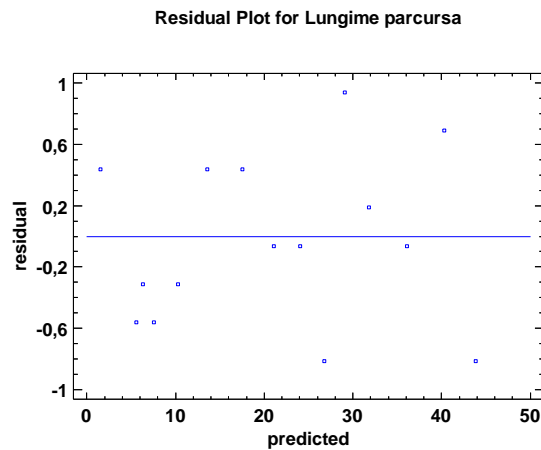


Figura 5.34. Diagrama rezidualilor

În tabelul 5.16. sunt prezentate valorile coeficienților de regresie pentru lungimea parcursă de materialul plastic. Pe baza acestor coeficienți se poate determina expresia modelului matematic.

Model matematic:

$$\begin{aligned} \text{Lungime parcursă} = & 19,6875 + 2,4375 * P + 5,1875 * T + 11,9375 * I + 2,5625 * US + \\ & 0,6875 * P * T + 0,9375 * P * I - 0,1875 * P * US + 1,1875 * T * I + 0,3125 * T * US - 0,9375 * I * US \end{aligned}$$

Tabelul 5.16. Coeficienți de regresie pentru „Lungime parcursă”

<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	19,6875
A: Presiune	2,4375
B: Temperatură	5,1875
C: Interstițiu	11,9375
D: Activare US	2,5625
AB	0,6875
AC	0,9375
AD	-0,1875
BC	1,1875
BD	0,3125
CD	-0,9375

În figura 5.35. sunt reprezentate efectele principale pentru funcția de răspuns: lungime parcursă. Se observă că atât cei patru factori de influență cât și interacțiunile lor, conduc la creșterea lungimii parcurse prin mărirea valorii lor de la minim la maxim.

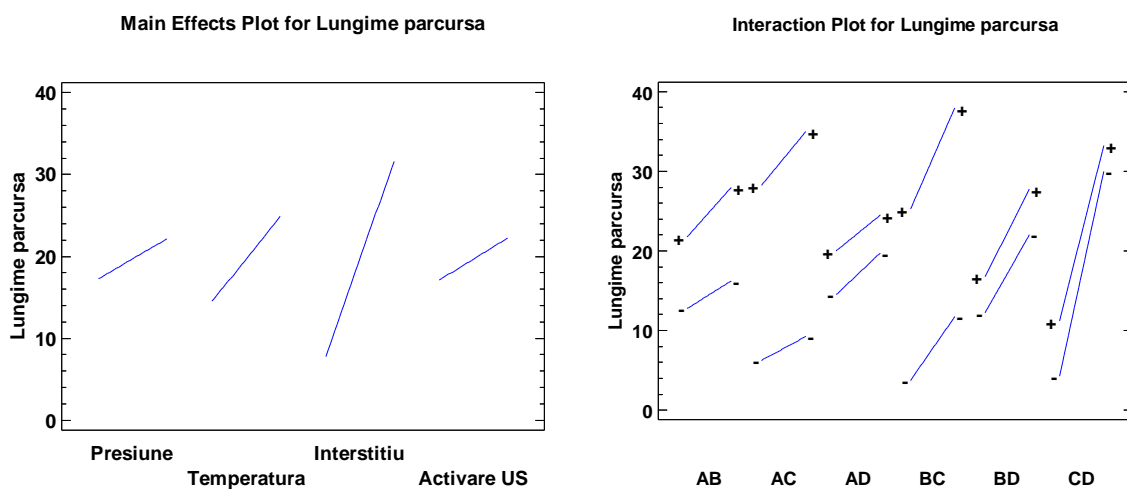


Figura 5.35. Efecte principale pentru „Lungime parcursă”

În figurile 5.36 până în figurile 5.41. sunt reprezentate variația în spațiu, sub formă de suprafață (a), sau în plan, sub formă de contururi obținute prin secționarea suprafeței de răspuns (b), a lungimii parcurse de materialul plastic în funcție de combinațiile dintre cei 4 factori de influență.

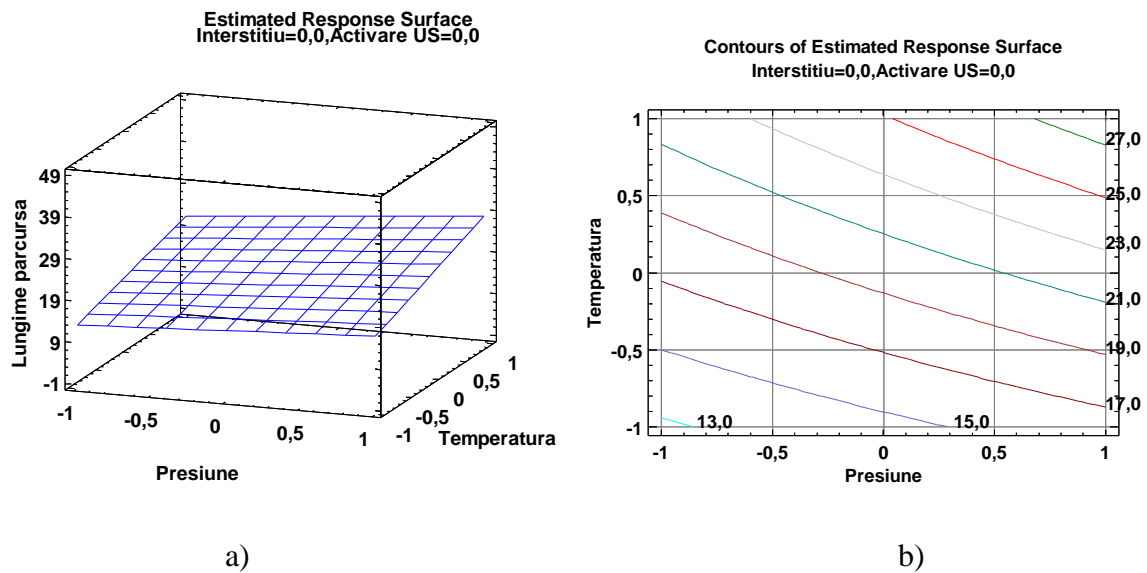


Figura 5.36. Influența presiunii și a temperaturii

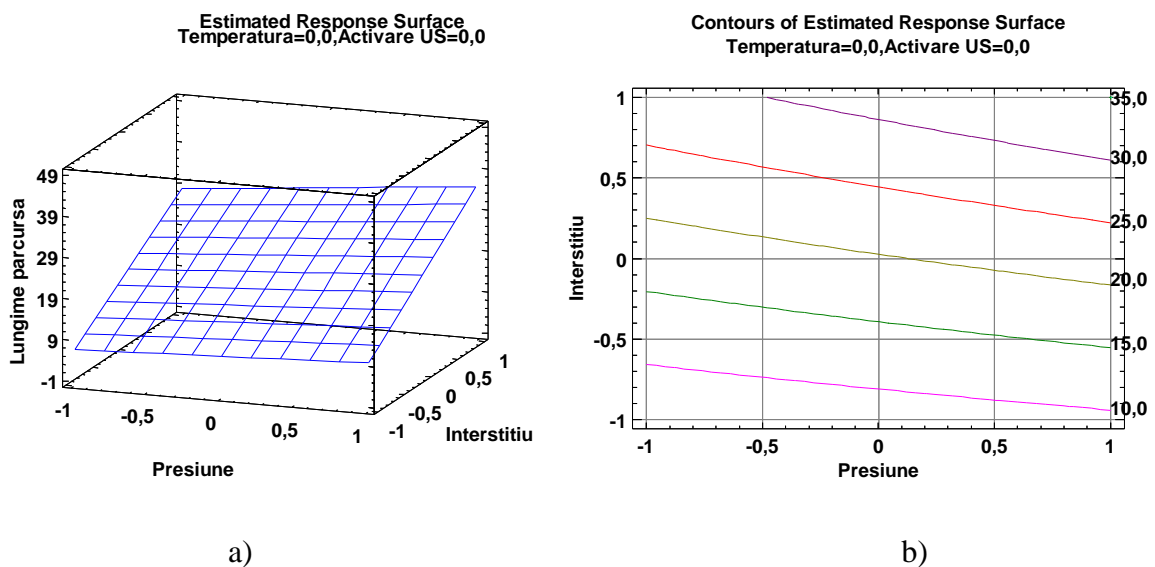
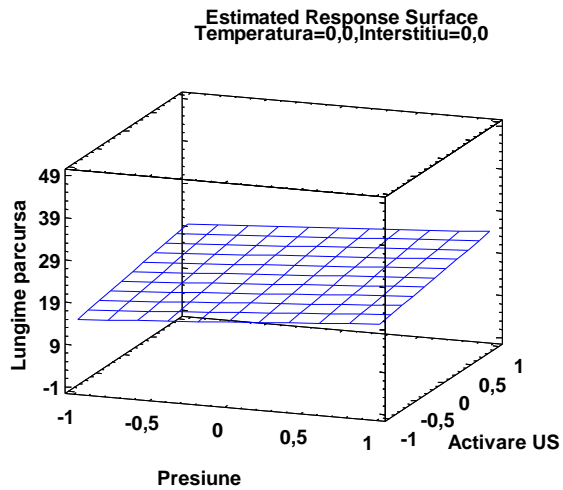
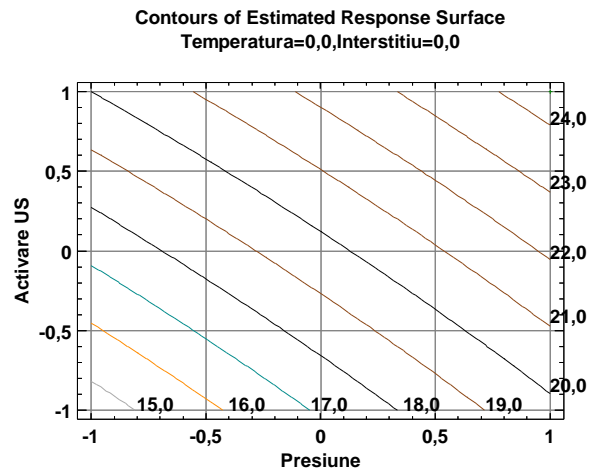


Figura 5.37. Influența presiunii și a interstițiului

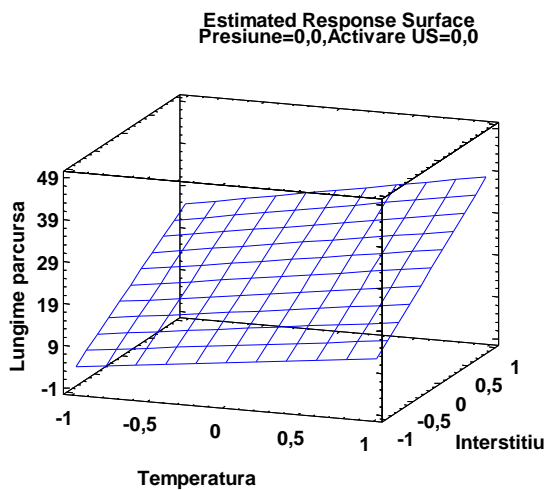


a)

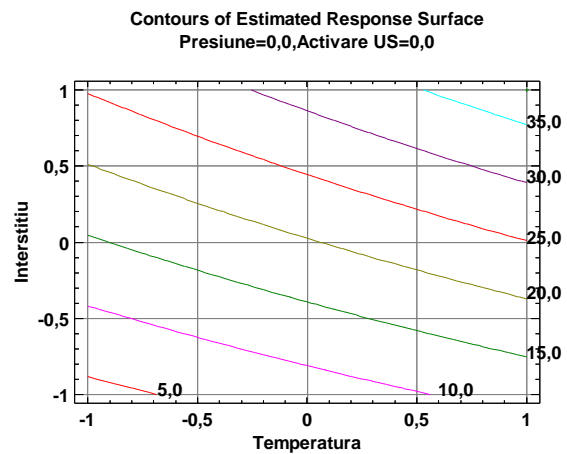


b)

Figura 5.38. Influența presiunii și a activării US



a)



b)

Figura 5.39. Influența temperaturii și a interstiului

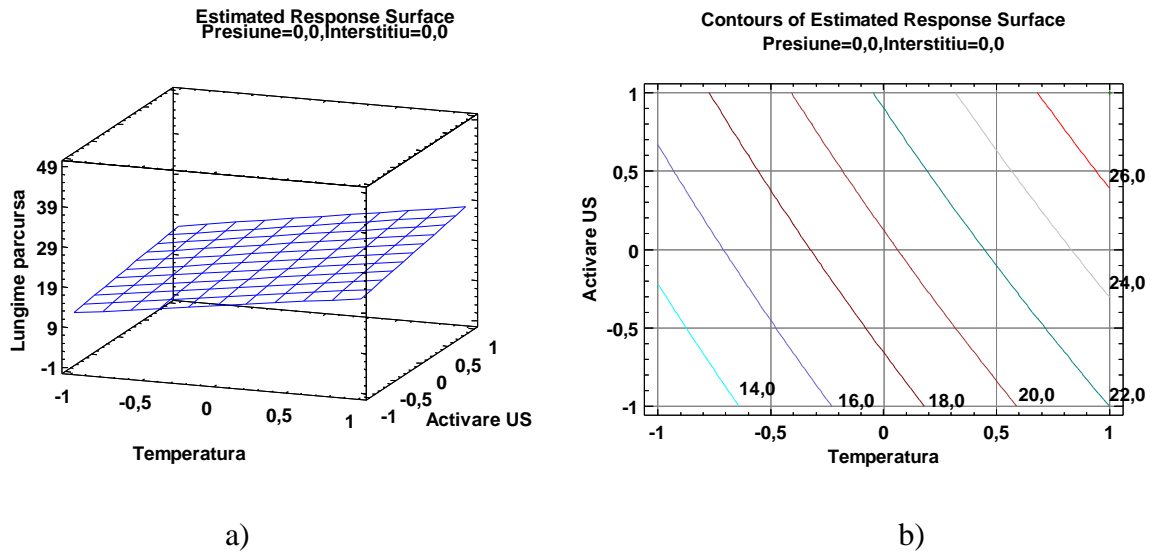


Figura 5

5.40. Influența temperaturii și a activării US

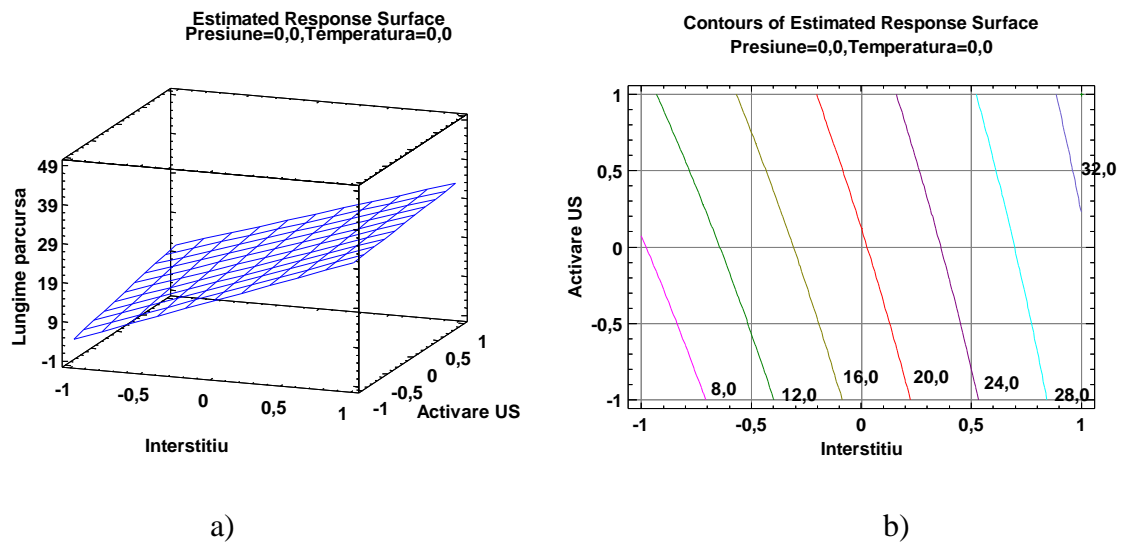


Figura 5.41. Influența interstițiului și a activării US

5.4. Interpretarea rezultatelor experimentale și concluzii

În acest capitolul au fost prezentate diagramele Pareto: Figura 5.13, Figura 5.18, Figura 5.27. și Figura 5.33, de ordonare a factorilor de influență « *interstițiu* » *i*, *temperatura* (topiturii) *T*», « *presiunea* » *p* și « *activare ultrasonică* » *US* după contribuția lor la modificarea variabilei de răspuns (funcția obiectiv) « *lungimea traseului parcurs* », *L*, de topitura de polimer.

În Tabelele ANOVA, valorile de prag de semnificație $P \leq 0.05$ (nivel de încredere > 95%) indică factorii de influență semnificativi, iar în diagramele Pareto, linia verticală, reprezentată pentru $P=0.05$, separă factorii semnificativi /la dreapta/ de ceilalți, mai puțin importanți /la stânga liniei/.

Pentru toate cazurile analizate : injectare în cuibul cu duza echipată cu activare ultrasonică și apoi în cel cu poanson activat, cu și fără activare, interstițiul de curgere "i" este factorul principal de influență. Această situație era de așteptat pentru că studiul a fost abordat pentru valori de interstițiu sub limita inferioară luată în considerare de obicei în literatura de specialitate, $i_{\min}=0,5$ mm. Orice majorare a interstițiului de curgere, chiar cu 0,1 mm poate decide asupra capacității topiturii de a umple zona respectivă.

Deasemenea se remarcă o influență majoră pe care o are temperatura topiturii, *T* în toate cele 4 diagrame Pareto, ea este al doilea factor de influență ca importanță asupra valorii funcției obiectiv *L*.

De remarcat că, această ordonare, a interstițiului și temperaturii pe primele două poziții nu este afectată de includerea în studiu a activării ultrasonice. Această situație arată că nu există interacțiuni majore combinate *i-US* sau *T-US*, fiind exclusă posibilitatea unor efecte spectaculoase ale activării ultrasonice.

Totuși, seturile de experimente factoriale 2^4 , în care duza, respectiv poansonul sunt activate ultrasonic (regim de activare descris în Tabelul 4.12) desemnează *activarea ultrasonică US* ca al treilea factor de influență după contribuția pe care o are la majorarea traseului de curgere.

Această situație este un argument pentru continuarea eforturilor de implementare industrială a activării ultrasonice în matrițe de injectare mai ales pentru studiu microinjectării.

Mai mult, comparând diagramele Pareto pentru studiile cu activare ultrasonică, Figura 5.18. și Figura 5.33, se poate spune că activarea ultrasonică ca factor de influență se dovedește a fi mai importantă decât presiunea aplicată topiturii (devansează presiunea în diagramele Pareto) ca factor de influență asupra lungimii de traseu parcurs de topitură. Diferența între

indicii de importanță a acestor doi factori de influență este mai mare în cazul activării ultrasonice a duzei.

Analiza cu element finit, de simulare a curgerii în matrița de injectare, cap. 5.1, confirmă rezultatele obținute experimental, de variație a lungimii traseului de curgere (umplere diferențiată) în funcție de valoarea interstițiului.

Determinări ale indicelui de curgere MFR pentru materialul pieselor obținute cu și fără activare ultrasonică indică o ușoară creștere de valoare, fără diferențierea clară a situației » cu activare ultrasonică ». Variația acestei caracteristici nu poate fi pusă pe seama activării ultrasonice ci este mai degrabă efectul degradării termice pe care materialul o suferă la fiecare trecere prin cilindrul mașinii de injectat. din acest motiv, literatura tehnică în domeniul injectării limitează timpul de staționare în cilindrul mașinii de injectat ("residence time") și procentul de material reciclat, Anexa 3b.

Capitolul 6

Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare

6.1. Concluzii

Tehnica injectării produselor din materiale polimerice este una consacrată și se regăsește ca principal instrument de lucru într-un sector de fabricație, cel al plasturgiei, remarcat și în prezent prin rate înalte de creștere. Criteriile principale de performanță care susțin tehnica injectării sunt relative la productivitatea procedurii, legată de cadențe ridicate de producție și de calitatea produselor injectate. Aceste criterii de performanță par să-și fi atins limitele prin optimizările procesului de injectare (corelația dintre presiune, temperatură) și prin perfecționări ale utilajelor și matrițelor care sunt echipamente relativ costisitoare.

Apariția cu 20 de ani în urmă a tehnicii de activare cu ultrasunete părea, cel puțin prin rezultatele obținute în laboratoarele de încercări, ca o posibilă extensie a performanțelor procesului datorită efectului ultrasonic termopelicular. Prin activarea ultrasonică era teoretic posibilă creșterea vitezei de injectare și ameliorarea calității prin eliminarea unor defecte tipice asociate. În ciuda unor cercetări susținute generos de sectorul public și cel privat (vezi programul european ULTRAMELT) sfera aplicațiilor rentabile industrial a fost considerabil limitată datorită dificultăților de acordare a sistemului ultrasonic rezonant cu elementele constructive ale matriței. La ora actuală există puține soluții tehnice direct aplicabile care aparțin unui număr redus de fabricanți (SUA, Elveția), a căror eforturi se îndreaptă mai mult pe adaptarea utilajului de injectare decât pe construcția matriței. Esența perfecționărilor tehnice folosite este secretizată.

În contextul de mai sus se profilează tot mai mult și tot mai atractiv posibilitatea activării ultrasonice a microinjectării prin intermediul elementelor active ale matriței – duza și/sau cuibul – asociată chiar cu reconfigurarea modului de injectare prin eliminarea utilajului de tip clasic (presa de injectare). Ideea de bază este aceea că prin spații de curgere de dimensiuni foarte mici ale matriței solidificarea și calitatea umplerii cuiburilor poate fi controlată și extinsă la dimensiuni foarte reduse prin activare ultrasonică.

Această orientare a fost deja abordată în cadrul unui proiect de cercetare FP7 de un grup european, iar în cadrul universității Politehnica Timișoara, în colaborare cu fabricantul de matrițe SC Inteliform Timișoara, s-au inițiat cercetări pe aceasta temă a microinjectării asistate ultrasonic. Există deja două soluții tehnice care constituie obiectul unor cereri de brevet de invenție și anume RO 129156/2013 « Matriță cu activare ultrasonică » titular SC

Inteliform Timișoara și RO129443/2013 « Matriță și procedeu de injectare a pieselor miniaturale » titular Universitatea Politehnica Timișoara.

Ca urmare a colaborării cu S.C. Nanointeliform în cadrul contractului BC19 /2013, având la dispoziție un generator de ultrasunete AMMM-Ultrasonics cu o plajă largă de autoreglare a frecvenței de oscilație, au fost reluate experimentele efectuate într-o teză anterioară de doctorat [SER12] și au fost validate sau reformulate concluziile referitoare la stabilitatea activării la rezonanță a unui sistem mecanic cu încărcare mecanică axială. Aceste rezultate au permis conturarea unui program de experimentare viabil și continuarea cercetărilor în cadrul prezentei teze.

Tema prezentei cercetări doctorale are în vedere completarea demersurilor inițiate mai sus prin studiul teoretic și experimental al îmbunătățirii calității pieselor miniaturale sau cu pereți subțiri obținute prin injectare activată ultrasonic. Calitatea pieselor exprimată deseori prin eliminarea unor defecte tipice care limitează aplicabilitatea injectării în general și a microinjectării în mod special a fost elementul principal care s-a urmărit în prezenta cercetare doctorală.

În cadrul primului capitol de definesc principalele materiale polimerice, se face o clasificare a lor și se prezintă modul în care sunt utilizate în industrie, în special în industria auto. Este definit principiul injectării materialelor plastice și principalii factori care influențează procesul de injecție. Un element cheie în cadrul cercetărilor întreprinse este de a cunoaște îndeaproape defectele care apar la piesele obținute prin injectare. În acest context s-a realizat o sinteză a principalelor defecte care apar la piesele produse prin injectare, s-au definit cauzele posibile pentru apariția defectelor și s-au făcut unele recomandări pentru a evita apariția lor.

În al doilea capitol s-a făcut o cercetare teoretică privind soluțiile tehnice folosite în prezent pe plan mondial la obținerea pieselor cu pereți subțiri prin injectare. S-a definit injectarea pieselor miniaturale și cu pereți subțiri, s-au definit dimensiunile minimale obținabile și ale unui cuib din matriță. S-au definit tehnicile de simulare și experimentul factorial folosite pentru analiza procesului de injectare în vederea obținerii unei calități mai bune a pieselor.

În capitolul 3 se definește obiectivul principal al tezei precum și cele derivate.

În capitolul patru se definește un model experimental pentru identificarea parametrilor de influență care apar la injectarea pieselor miniaturale sau cu pereți subțiri. Pentru acest lucru s-a studiat comportamentul reologic al topiturii de polimer din spațiile de dimensiuni reduse a cuibului matriței și s-au studiat efectele temperaturii asupra topiturii de polimer. În acest

capitol este definit și principiul activării ultrasonice pentru care s-a făcut un studiu comparativ al modelelor practice de activare și un studiu comparativ al brevetelor de invenție existente pentru matrițe de injectare activate ultrasonic.

În studiul experimental al proceselor tehnologice, în vederea optimizării parametrilor acestora, sunt multe cazuri în care sunt implicați doi sau mai mulți factori, având efect direct asupra răspunsului sistemului dar mai ales interacțiunea acestora primând uneori față de cea a factorilor înșiși. Pentru acest lucru s-a folosit experimentul factorial care realizează o reducere importantă a numărului de încercări și optimizează programului de experimentare. Modelarea cu ajutorul experimentelor factoriale are ca o primă etapă definirea problemei de rezolvat, adică precizarea funcției (funcțiilor) obiectiv, urmată de identificarea factorilor de influență. Problema pusă spre rezolvare trebuie să fie corect definită și să fie consistentă, adică rezolvarea ei să furnizeze informații utile referitoare la procesul sau fenomenul studiat, iar factorii de influență identificați să corespundă caracteristicilor pe care o asemenea mărime trebuie să le îndeplinească.

În capitolul patru s-au mai făcut experimente preliminare pentru stabilirea materialului folosit, s-au stabilit limitele variațiilor a interstițiului de curgere și s-a făcut o planificare a experimentului factorial.

În capitolul cinci se tratează cercetările experimentale obținute în scopul evidențierii rezultatelor pentru diferitele injectări efectuate. Datele obținute în urma încercărilor au servit la elaborarea unor modele matematice referitoare la interacțiunea diferiților factori de influență (presiune, temperatură, interstițiu și activare ultrasonică) asupra calității pieselor injectate.

De multe ori, în cazul cercetărilor teoretice și experimentale, nu este îndeajuns să obținem doar valori. Acestea trebuie să fie analizate și interpretate. Reprezentarea și analizarea lor ocupă un loc cheie în finalizarea cercetărilor prin concluzii. Datele numerice obținute s-au prelucrat cu ajutorul programului de calculator „Statgraphics”. Acest program folosește analiza dispersională de varianță, ANOVA. Din această analiză, programul determină, pentru fiecare efect în parte, valoarea criteriului Fisher, iar în final generează o diagramă tip Pareto.

În acest capitol s-a mai efectuat și o simulare a curgerii în matriță folosind elementul finit. Pentru toate cazurile analizate : injectare în cuibul cu duza echipată cu activare ultrasonică și apoi în cel cu poanson-cuib activat, cu și fără activare, interstițiul de curgere "i" este factorul principal de influență. Această situație era de așteptat pentru că studiul a fost abordat pentru valori de interstițiu sub limita inferioară luată în considerare de obicei în

literatura de specialitate, $i_{\min}=0,5$ mm. Orice majorare a interstițiului de curgere, chiar cu 0,1 mm poate decide asupra capacității topiturii de a umple zona respectivă.

Se remarcă o influență majoră pe care o are temperatura topiturii în toate cele 4 diagrame Pareto, temperatura T este al doilea factor de influență ca importanță asupra valorii funcției obiectiv L.

Seturile de experimente factoriale 2^4 , în care duza, respectiv poansonul sunt activate ultrasonic (regim de activare descris în Tabelul 4.8) desemnează activarea ultrasonică ca al treilea factor de influență după contribuția pe care o are la majorarea traseului de curgere.

Comparând diagramele Pareto pentru studiile cu activare ultrasonică (Figura 5.18. și Figura 5.33) se poate spune că, activarea ultrasonică ca factor de influență, se dovedește a fi mai importantă decât presiunea aplicată topiturii ca factor de influență asupra lungimii de traseu parcurs de topitură.

În final se poate trage concluzia că activarea ultrasonică fie unilaterală pe un element activ (duză sau cuib) fie simultană (duză și cuib) conduce la o creștere a capabilității de umplere cu consecințe favorabile în « miniaturizarea » injectării și cu consecințe benefice în eliminarea defectelor de umplere și deci a calității în microinjectare.

6.2. Contribuții personale

- Realizarea unui *studiu de sinteză și analiză* cu privire la principalele materiale polimerice utilizate în industrie, elementele lor componente și adaptarea lor la diferite aplicații industriale;
- Realizarea unei *sinteze a principalelor defecte* care apar la piesele din materiale polimerice produse prin injectare, studiu ce cuprinde și o listă cu recomandări pentru prevenirea apariției lor;
- Realizarea unui *studiu de cercetare teoretică privind soluțiile tehnice relative* la microinjectare și injectarea pieselor cu pereți subțiri;
- Utilizarea în încercările experimentale a unei *matrițe pentru microinjectare* activată ultrasonic, adaptare a soluției propuse de cererea de brevet de invenție RO 129156/2013 « Matriță cu activare ultrasonică »
- Concepția și realizarea unui *studiu experimental pentru identificarea parametrilor de influență* care apar la injectarea pieselor cu pereți subțiri;
- Realizarea unui *simulări a curgerii în cavitățile matriței* folosind metoda elementului finit, simulare care să valideze modelul experimental;

- Realizarea unor *încercări experimentale* pentru diferiți parametri de injectare (injectări cu sau fără activarea ultrasonică a duzei, injectări cu sau fără activarea ultrasonică a poansonului-cuibului);
- *Prelucrarea statistică a datelor experimentale*, cu ajutorul programului pe calculator „Statgraphics” a celor patru factori de influență (presiune, temperatură, interstițiu și activare ultrasonică).

6.3. Direcții viitoare de cercetare

- Studiul comportamentului pentru mai multe materiale polimerice supuse activării ultrasonice;
- Studiul unei variante constructive de matriță de microinjectare cu activare ultrasonică simultană a pistonului din duza de injecție și a cuibului matriței;
- Explorarea limitelor dimensionale inferioare în microinjectare.

Bibliografie

1. [ADA13] **Adam Andrei**, Cosma Cristian, Dume Adrian Ilie, Jadaneantu Sorin. Integration of CAD CAM techniques in the development of an injection mould for automotive parts. *Solid State Phenomena*, Volume 216, pp 322-325, ISBN 978-3-03835-212-9;
2. [ADA14a] **Adam Andrei**, Stefan Pavel, Jifcu Adrian-Dean, Lacatusu Florin. QUALITY CONTROL USING COMPUTER AIDED SIMULATIONS FOR THIN WALL PLASTIC PARTS, 2014 International Conference on Production Research – Regional Conference Africa, Europe and the Middle East 3rd International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management, 978-973-662-978-5, page 16-20 1-5 Iulie 2014, Cluj-Napoca, Romania;
3. [ADA14b] **Adam Andrei**, Cosma Cristian, Pop Andrei, Ultrasonic Activated Injection Used on Manufacturing Thin Wall Plastic Parts, Paper ID: 978-0-0001-761-1_600. OPTIROB 2014- 9th International Conference on Aerospace, Robotics, Mechanical Engineering, Manufacturing Systems, Neurorehabilitation and Human motricities (OPTIROB 2014). 26-29 Iunie, 2014, Mangalia, Romania;
4. [ADA14c] **Adam Andrei**, Cosma Cristian, Comsa Alexandru, Pop Adrian, Redesigning a product using modern CAD-CAM software, 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2014, 9-10 October 2014, Tirgu-Mures, Romania. Elsevier;
5. [ATT12] U M Attia and J R Alcock, An evaluation of process-parameter and part-geometry effects on the quality of filling in micro-injection moulding, *Journal Microsystem Tehnologies* Volume 15 Number 12, November 2012;
6. [BAC95] Bacher W, Menz W and Mohr J 1995 The LIGA technique and its potential for microsystems—a survey *IEEE Trans. Ind. Electron.* 42 431–41.
7. [BAR71] Barrie, I.T., Understanding how an injection mod fills, *SPE journal*, (1971) 27, pp. 64-69;
8. [BAR07] Bariani P.F., Salvador M., Lucchetta G., 2007 – Development of a test method for the rheological characterization of polymers under the injection molding process conditions, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 191, Issue: 1-3 2007, pp. 119-122;

9. [BOT95] Both A, Bacher W, Hecke M, Muller K D, Ruprecht R and Strohmann M 1995 Molding process with high alignment precision for the LIGA-technology *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference* pp 186–90;
10. [BUS94] Bushko, W. C., Stokes, V. K., *The Effects of Differential Mold Temperatures on the Warpage of Packed Injection-Molded Parts*, Proceedings from the 1994 Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, v. 52, pp. 506 (1994);
11. [CHE01] Chen, M., Yao, D., Kim, B., *Polym. Plast. Technol. Eng.* (2001) 40, p. 491;
12. [CHI05] Chien, R.D., Jong, W.R, Chen, S.C., Study on rheological behaviour of polymer melt flowing through micro-channels, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15, pp. 1389-1396, (2005);
13. [CRO79] Cross, M., *Relation between Viscoelasticity and Shear Thinning Behavior in Liquids*, *Rheological Acta*, v. 18, pp. 609 (1979);
14. [DAL07] Dal Molin, M., Validation and optimization of FEM simulation of micro injection molded parts, MSc student thesis, January 2007.
15. [DEM02] De Mello A (2002) Plastic fantastic? *Lab Chip* 2:31N-36N;
16. [DES99] Despa, M.S., Kelly, K.W., Collier, J.R., *Microsystem Technologies* (1999) 6, p.60;
17. [EHR95] Ehrfeld, W., Lehr, H., *Radiat. Phys. Chem.* (1995) 45 (3), p. 349;
18. [ELI03] Elias, H., *An introduction to plastics, 2., complete new revised ed.* Wiley-VCH, Weinheim, 2003;
19. [ERI08] Eriksson L, Johansson N, Kettaneh-Wold N, Wikstrom C and Wold S (2008) *Design of experiments: principles and applications*, 3rd edn. Umetrics, Umeå;
20. [FEL77] Feldman, D., Rusu, M., *Tehnologii de prelucrare a polimerilor. Prelucrarea materialelor plastice*, I.P. Iași, Rotaprint, 1977;
21. [GAN99] Ganz, M., *Polymer Process Engineering*, ed. P.D. Coates, IOM Communications Ltd., London (1999) p. 8-17;
22. [GAV07] Gava A, Tosello G et al. *Proceedings of the 9th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM)* (2007) 307–312;
23. [GHA06] Gharagheizi F., Angaji M.T., *Scaling Approach for Thin Wall Injection Moulding by Dimensional Analysis*, *Iranian Polymer Journal*, vol. 15, nr. 1, 2006;

24. [GUA07] Guarise, M., Filling of micro injection moulded parts: an experimental investigation, MSc student thesis, January 2007;
25. [HAN06] Han X et al. *Polymer Engineering and Science*. 46:11 (2006) 1590–1597;
26. [HAW84] Hawkins, W.L., *Polymer Degradation and Stabilization*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1984;
27. [HEY01] Heyl, P., Olschewsky, T., Wijnaendts, R.W., *Microelectronic Engineering* (2001) 57-58, pp. 775-780;
28. [HOL97] Holmann J. P., *Heat transfer*, McGraw-Hill, 1997, 8th int. Edition;
29. [HU94] Hu, J., Vogel, J.H., *Dynamic Modeling and Control of Packing Pressure in Injection Molding*, *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 116, n. 2 (April 1994);
30. [ICL06] Iclanzan Tudor – Tehnologia prelucrării maselor plastice, Ed. POLITEHNICA, 2006;
31. [JAW03] Jaworski MJ et al. *Proceedings of the 62nd Annual Technical Conference ANTEC* (2003) 642–646;
32. [KAM88] Kamal, M., Goyal, S., Chu, E., *Simulation of Injection Mold Filling of a Viscoelastic Polymer with Fountain Flow*, *The American Institute of Chemical Engineers*, v. 34, pp. 94 (1988);
33. [KAN05] Kang, K., Lee, L.J., Koelling, K.W., *Experiments in fluids* (2005) 38, p. 222;
34. [KAZ94] Kazmer, D. O., Roe, D. S., *Increasing Weld-Line Strength through Dynamic Control of Volumetric Shrinkage*, *Proceedings from the 1994 Annual Technical Meeting of the Society of Plastics Engineers*, v. 52, pp. 631 (1994);
35. [KAZ06] Kazmer, D., *Precision process control of injection molding*, *Precision injection molding*, (2006), p. 265;
36. [KEN95] Kennedy, P.K., *Flow analysis of injection molds* (1995) Hanser, Munich;
37. [KEN00] Kemmann O., Weber L., e.a., *Simulation of the micro-injection molding process*, SPE ANTEC, 2000;
38. [KIM03] Kim, B., *NSF design, service and manufacturing grantees and research conference proceedings*, (2003) p. 1972;
39. [LEW94] Lewis, L., Parkinson, A., *Robust Optimal Design Using a Second Order Tolerance Model*, *Research in Engineering Design*, v. 6, pp. 25 (1994);

40. [LON09] Long Yu-Qiu, Chen Song, Long Zhi-Fei, 2009 – Advance Finite Element Method in Structural Engineering, Edited by Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-00315-8;
41. [LOR75] Lord, H.A., Williams, G., Mold-filling studies for the injection molding of thermoplastic materials, *Polym. Eng. Sci.*, (1975) 15, pp 569-582;
42. [MAD02] Madou, M.J., Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization, 2nd edition (2002) CRC Press, Boca Raton, FL;
43. [MAL94] Malloy R. – Plastic part design for injection molding, Carl Hanser Verlag, Munchen-New York, 1994;
44. [MAL04] Malek, C.K., Saile, V., *Microelectronics journal* (2004) 35 (2), pp. 131-143;
45. [MAT91] Matsuoka, T., Takabatake, J.I., Koiwai, A., *Integrated Simulation to Predict Warpage of Injection Molded Parts*, *Polymer Engineering and Science*, v. 31, n. 14 (July 1991);
46. [MAU05] Maurice H.E. van der Beek Specific volume of polymers : influence of the thermomechanical – Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2005;
47. [Mcc89] McCrum, N.G., Buckley, C.P., Bucknall, Principles of Polymer Engineering, Oxford Science Publications, Oxford, 1989;
48. [MEH03] Mehta MN et al. Proceedings of the 62nd Annual Technical Conference ANTEC (2003) 3550–3554;
49. [MEN91] Menz W, Bacher W, Harmening M and Michel A 1991 The LIGA technique—a novel concept for microstructures and the combination with Si-technologies by injection molding *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop* pp 69–73;
50. [MOA01] Moalli, J., 2001 – *Plastics Failure Analysis and Prevention*, *Plastics Design Library*, ISBN: 1-884207-92-8;
51. [MOT06] Motta, P., Validation of numerical simulation in micro injection moulding, MSc student thesis, April 2006;
52. [MUC92] Muccio, E.A., *Plastic Part Technology*, ASM International, Material Park, Ohio, 1992, pp. 176;
53. [NAG93] Nagy, M. R., *Long-Term Shrinkage of Polypropylene*, Proceedings from the 1993 Annual Technical Meeting of the Society of Plastics Engineers, v. 51, pp. 2155 (1993);

54. [OKE93] Okeke, E. J., Cosma, L., *Dimensional Repeatability of Gas Assisted Injection Molding and Cavity Pressure Controlled Closed Loop Injection Molding for Structural Parts*, Proceedings from the 1993 Annual Technical Meeting of the Society of Plastics Engineers, v. 51, pp. 79 (1993);
55. [OTT93] Otto, K. N., Antonsson, E. K., *The Method of Imprecision Compared to Utility Theory for Design Selection Problems*, Design Theory and Methodology, v. 53, pp. 167 (1993);
56. [PIO02] Piotter V et al. *Microsystem Technologies*. 8 (2002) 387–390;
57. [PLA03] Platt KDavid -Engineering and High Performance Plastics Market Report Editura Rapra Technology Limited , 2003;
58. [RUP95] Ruprecht R, Hanemann T, Piotter V and Hausselt J 1995 Injection molding of LIGA and LIGA-similar microstructures using filled and unfilled thermoplastics *Proc. SPIE* 2639 146–57;
59. [SAN83] Sanschagrın, B., *Process Control for Injection Molding*, Polymer engineering and Science, v. 23, n. 8, pp. 431 (1983);
60. [SCH02] Schmidt, D., Shah, D., Giannelis, E.P., Current opinion in solid state and materials science (2002) 6, pp. 205-212;
61. [SCH02] Schmidt, D., Shah, D., Giannelis, E.P., Current opinion in solid state and materials science (2002) 6, pp. 205-212.
62. [SCH03] Schinkothe W., *Temperierkonzepte für das Mikrospritzgießen im Vergleich / A comparison of temperature regulating concepts for injection moulding of parts with microstructures*, 18-te. Stuttgarter-Kolloquium, 2003;
63. [SER12] Iancu Serban, *Studiul activării ultrasonice a proceselor de curgere a materialelor polimerice termoplastice cu aplicare la procedeele de microinjectare și injectare a pieselor cu pereți subțiri*, Editura Politehnica. 2012;
64. [SHA78] Shah, R.K., London, A.L., *Advances in heat transfer*, (1978), Academic Press, New York;
65. [SID75] Sidney Gross, Ed., *"Modern Plastics Encyclopedia,"* Volume 51, No. 10A, McGraw-Hill, New York, 1974-1975;
66. [SIR09] Sîrbu A.N., *Cercetări teoretice și experimentale privind activarea cu ultrasunete a proceselor de curgere a materialelor polimerice*, Teză de doctorat, Timișoara, 2009;
67. [SMI98] Smialek D., Simpson C.L. - *Thin Wall Injection Moulding*, Special Molding Techniques, 1998;

68. [SMU91] Smud, S. M., Harper, D. O., Deshpande, P. B., *Advanced Process Control for Injection Molding*, Polymer Engineering and Science, v. 31, n. 15 (1991);
69. [SNY99] Snyder, M.R., Modern plastics, January (1999), p.85;
70. [STA00] 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;
71. [STA03] Stan D., Aplicații ale ultrasunetelor în procesarea materialelor plastice, Editura politehnica;
72. [STE14] Stefan Pavel, Jifcu Adrian-Dean, Lacatusu Florin, **Adam Andrei**: IMPROVING AND MODERNIZATION OF LIGHTING FOR DENTAL LABORATORIES – POTERRY ROOM, 2014 International Conference on Production Research – Regional Conference Africa, Europe and the Middle East 3rd International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management, 978-973-662-978-5, page 16-20 1-5 Iulie 2014, Cluj-Napoca, Romania;
73. [TOS07] Tosello G et al. Proceedings of the 3rd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M) (2007) 259–262;
74. [TOS10] G. Tosello, A. Schoth, H.N. Hansen, Implementation strategies for the optimization of micro injection moulding simulations, Technical University of Denmark (DTU), Department of Mechanical Engineering, Produktionstorvet, Building 427S, DK-2800 Kgs. Lyngby, 2010, Denmark;
75. [WAN86] Wang, V. W., Hieber, C. A., Wang, K. K., *Filling of an Arbitrary Three Dimensional Thin Cavity*, Journal of Polymer Engineering, v. 7, pp. 21 (1986);
76. [WHI05] Whiteside BR et al. International Polymer Processing. Vol. XXI-5 (2005) 162–169;
77. [WHI06] Whiteside, B.R., Martyn, M.T., Coates, P.D., An introduction to micromolding, (2006), p.239;
78. [WIL75] Williams, G., Lord, H., *Mold-Filling Studies for the Injection Molding Process with PVC in Injection Molding*, Polymer Engineering and Science, v. 15, pp. 553 (1975);
79. [WIM00] Wimberger-Friedl R (2000) Injection molding of sub- μm grating optical elements. J Inject Molding Technol 4:78-83;
80. [XU02] Xu, G., L., Lee, L.J. Koelling, K.W., Polym. Eng. Sci. (2005) 45, p. 866;

81. [YAH02] Yao D and Kim B (2002) Injection molding high aspect ratio microfeatures. *J Manuf Sci E-T ASME* 126:11-17;
82. [YU90] Yu, C.J., Sunderland, J.E., Poli, C., *Polym. Eng. Sci.* (1990) 30, p. 1599;
83. [YU02] Yu, L., Koh C.G., Lee, L.J. and Koelling, K.W., *Polym. Eng. Sci.* (2002) 42, p. 871;
84. [YOK94] Yokoi, H., Nagami, S., Kawasaki, A., Murata, Y., *Visual Analyses of Flow Marks Generation Process Using Glass-Inserted Mold*, Proceedings from the 1994 Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, v. 52, pp. 368 (1994);
85. [YU04] Yu-Chuan Su, Jatan Shah and Liwei Lin, Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding, *J. Micromech. Microeng.* 1 (2004) 415–422;
86. [ZHA03a] Zhang, J., Wilkie, C.A., *Polymer degradation and stability* (2003) 80, pp;
87. [ZHA03b] Zhao J, Mayes R, Chen G, Xie H and Chan P (2003) Effects of process parameters on the micro molding process. *Polym Eng Sci* 43:1542-1554;
88. www.curbellplastics.com
89. www.eplastics.com
90. www.kraus-maffei.com
91. www.ultramelt.org
92. www.wikipedia.org
93. <http://www.EcoDesignARC.info>.
94. www.moldflow.com Moldflow Plastics Insight 2007
95. <http://en.wikipedia.org/wiki/polymers>
96. [htt://www.sideris.ro](http://www.sideris.ro)
97. http://www.umgabs.co.jp/en/solution/trouble/t_35.htm
98. <http://www.penerbit.utm.my/>
100. <http://www.spcforexcel>
101. <http://www.mase-plastice.ro/dictionar/a.html>
102. Bv. No. 118576 B/2003 Romania " Matriță de injectare activată ultrasonic"
103. Bv. No. 118400 B/2003 Romania ""Procedeu și cap de extrudare activat ultrasonic"
104. Bv. No. 2000271971/2000 Japan "Sprueless miniature runner type mold applying ultrasonic energy"

- 105.Bv. 2001001370/2001 Japan "Ultrasonic injection mold"
- 106.Bv. 2001062878/2001 Japan "Ultrasonic injection mold for optical disk"
- 107.CBI RO 129156 Matriță cu activare ultrasonică
- 108.CBI RO 129443 Matriță și procedeu de injectare a pieselor miniaturale

Anexe

Anexa 1

D. Stan, I. Șerban, C. Cioană, C. Cosma – *Study on the influence of the processing parameters in the ultrasonic activated injection and extrusion*, ModTech International Conference - New face of TMCR , Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR , 24-26 May 2012, Sinaia, Romania

Rezultate experimentale:

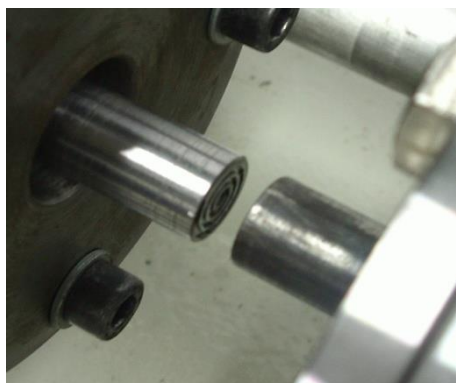


Fig. 3 Spiral channel on the front of the ultrasonic horn

P [daN/ cm ²]	Ti [°C]	Tm [°C]	US [--]	LSp [mm]
40	210	35	0	7,02
20	250	35	0	7,20
20	250	50	0	8,84
40	210	50	0	13,57
20	210	50	0	6,31
40	250	35	0	10,83
20	210	35	0	3,79
40	250	50	0	15,91
40	210	40	0	11,62
20	210	35	1	3,65
40	250	50	1	19,7
20	250	35	1	8,35
40	210	50	1	18,4
40	210	35	1	9,7
40	250	35	1	15,1
20	250	50	1	10,4
20	210	50	1	7,05

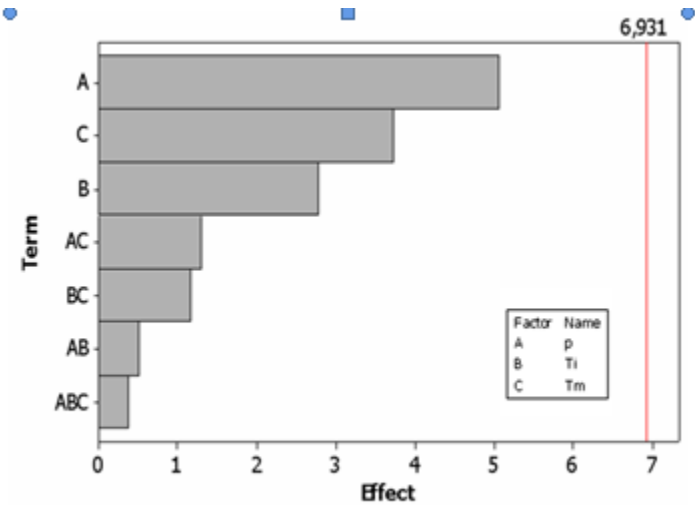
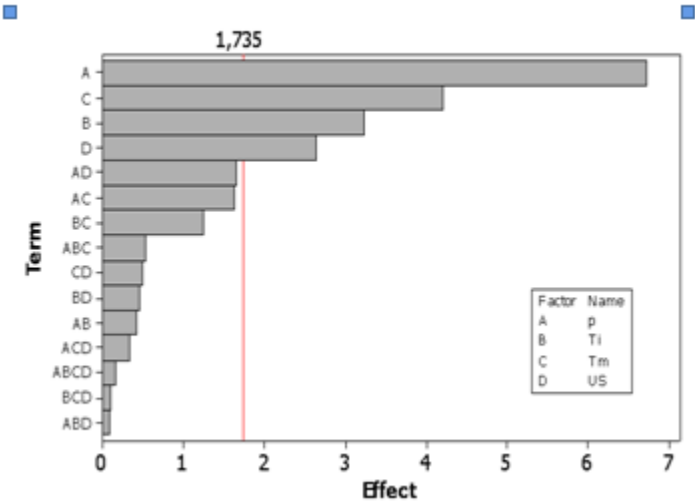


Fig. 4 Pareto chart of the effects, 3 factorial experiment



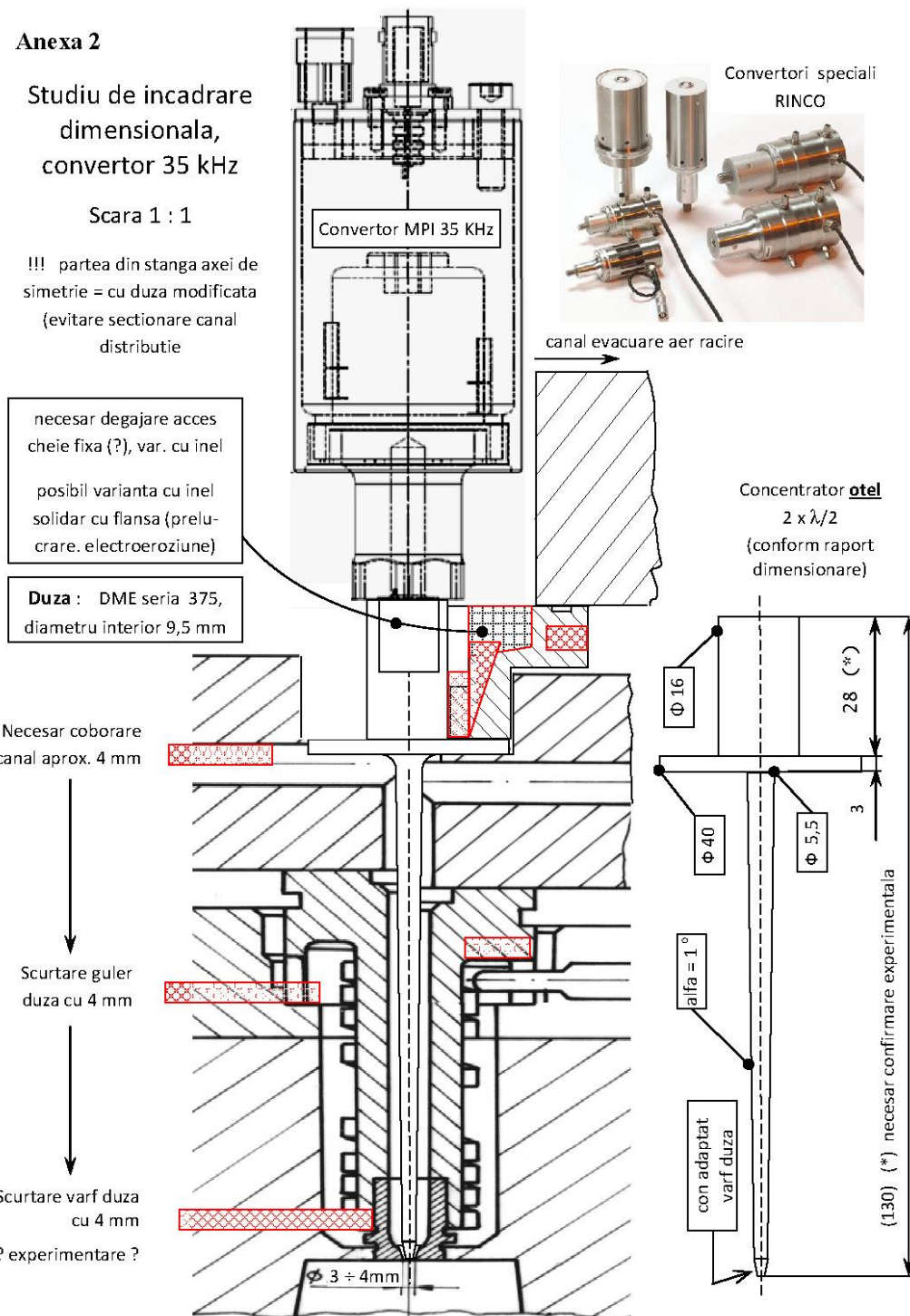
Anexa 2

Anexa 2

Studiu de incadrare
dimensionala,
convector 35 kHz

Scara 1 : 1

!!! partea din stanga axei de
simetrie = cu duza modificata
(evitare sectionare canal
distributie



Anexa 3

Anexa 3a

Database Dr.DMold. Materials, Autodesk Inventor

(http://wikihelp.autodesk.com/Inventor/enu/2011/Help/User%27s_Guide/112Tooling/2010MoldDesign/2027Initialdesign/2030SelectMaterial/2031Materialproperties/2035Applicationsformat)

material	MFR [g/10 min]	load [kg]	T _{MFR} [°C]	T _{inj} , [°C]		T _m , [°C]		T _{eject} [°C]	
				min	recom.	min	recom. max		
PEHD	15	2,16	190	180	220	20	40	95	100
PELD	10	2,16	190	180	220	20	40	70	80
PP	20	2,16	230	200	230	20	50	80	92,5
PPE	40	10	265	240	280	60	80	110	127,5
PS	15	5	200	180	230	20	50	70	80
ABS	35	10	220	200	230	25	50	80	87,5
SAN	30	10	220	200	230	40	60	80	85
PA12	95	5	275	230	255	30	80	110	135
PA6	110	5	275	230	255	70	85	110	132,5
PA6.6	100	5	275	260	280	70	80	110	157,5
POM	20	2,16	190	180	210	50	70	105	117,5
PBT	35	2,16	250	220	250	15	60	80	125
PMMA	10	3,8	230	240	250	35	60	80	85
PC	20	1,2	300	260	305	70	95	120	127
PC / ABS	12	5	240	230	265	50	75	100	117
PC / PBT	46	5	275	250	265	40	60	85	125
PET	27	5	290	265	270	80	100	120	150
PETG	23	5	260	220	255	10	15	30	58,5
PEI	15	5	340	340	400	70	140	175	190,5
PVC	50	10	200	160	190	20	40	70	75

Anexa 3b

Informații utile privind procesarea prin injectare a materialelor polimerice de uz curent

Material	P_{inj} , (bari)	$P_{\bar{u}}$, (% din P_{inj})	Contrapres la dozare, (bari)	Viteza injectare V_{inj}	Uscare material	Rezistă în exploatare până la (**) T_{max} , [°C]	Temp. la injectare [°C] (***)	Temperat matriță, [°C]	Contractie specifică, [%]	Material reciclat admis, [%]
CA	650÷1350	(40+60)· P_{inj}	40 ÷ 80	↑ pt. g ↓	2 ÷ 3 ore 80 °C	70÷85	210÷225	60 ÷ 80		50
CAB	650÷1350	(40+60)· P_{inj}	40 ÷ 80	↓ pt. g ↑	2 ÷ 3 ore 70 °C	80	180÷190	60 ÷ 70	0,4 ÷ 0,7	50
PS	600÷1600	(40+60)· P_{inj}	100 ÷ 200	(*)	1 ÷ 2 ore 55 °C	60 ÷ 70	210÷230	20 ÷ 60	0,4 ÷ 0,6	15 ÷ 20 (100)
PAS	600÷1600	(40+60)· P_{inj}	100 ÷ 200				220÷250	50 ÷ 80		
SAN	600÷1500	(45+60)· P_{inj}	100 ÷ 200	↑, în general	2 ÷ 4 ore 80 °C	85	210÷250	40 ÷ 80	0,3 ÷ 0,7	15 ÷ 20
ABS	800÷1600	(45+60)· P_{inj}	100 ÷ 250		2 ÷ 3 ore 70 °C	80 ÷ 120	220÷260	50 ÷ 85	0,4 ÷ 0,6	30
PA6	700÷1600	≈ 50· P_{inj}	50 ÷ 100	↑, în general	2 ÷ 3 ore 80 °C	110	250÷260	20 ÷ 120	1 ÷ 1,5	10
PA6.6						120	290÷300	40 ÷ 120	1,5 ÷ 2	
PE-JD	600÷1200	≈ 40· P_{inj}	50 ÷ 80	↑ pt. g ↓ medie în general	(***)	85 ÷ 95	180÷220	20 ÷ 40	1,5 ÷ 3,5	100
PEID	600÷1500	(40+60)· P_{inj}	80 ÷ 100			90 ÷ 110	250÷280	20 ÷ 60	1,5 ÷ 4	30 (100)
PP	800÷1800	(40+80)· P_{inj}	100 ÷ 200	↑, în general	1 ÷ 2 ore 65 °C	130 ÷ 140	240÷280	20 ÷ 60	1,2 ÷ 2,5	20 (100)
PMMA	1000÷1600	≈ 50· P_{inj}	100 ÷ 300	(*)	6 ÷ 8 ore 80 °C	70 ÷ 90	230÷250	40 ÷ 90	0,4 ÷ 0,7	20
POM	1200÷1700	(50÷70)· P_{inj}	100 ÷ 200	↑ pt. g ↓	3 ÷ 4 ore 80 °C	140	205÷215	60 ÷ 100	1,5 ÷ 2,8	30
PC	1300÷1800	(40÷60)· P_{inj}	80 ÷ 150	↓ pt. g ↑	8÷10 ore 120 °C	135	260÷290	80 ÷ 110	0,4 ÷ 0,8	20

Material	P_{inj} , (bari)	P_u , (% din P_{inj})	Contrapres la dozare, (bari)	Viteza injectare V_{inj}	Uscare material	Rezistență în exploatare până la T_{max} , [°C]	Temp. la injectare [°C] (****)	Temperat matriță, [°C]	Contracti e specifică, [%]	Material reciclat admis, [%]
PVC	D	900÷1600 (40÷60)· P_{inj}	40 ÷ 120	↓, în general	---	60 ÷ 70	170÷200	20 ÷ 60	0,2 ÷ 0,6	30
	M	600÷1500 (30÷50)· P_{inj}	40 ÷ 100							
PTFE		1300÷1800 (40÷60)· P_{inj}	200 ÷ 400	(*) medie	(***) 3 ÷ 4 ore 80 °C	250	330÷360	140 ÷ 230	1,5 ÷ 2,5	20
		1200÷1500 (40÷60)· P_{inj}	200 ÷ 350							
PVF		800÷1200 $\approx 40 \cdot P_{inj}$	100 ÷ 250	(*)	3 ÷ 4 ore 100 °C	160	260÷270	90 ÷ 130	2 ÷ 3	15 ÷ 20
		1200÷1600 (50÷70)· P_{inj}	50 ÷ 100							
PET	(a)	800÷1500 (50÷70)· P_{inj}	50 ÷ 100	↑ pt. g ↓ , ↓ pt. g ↑	3 ÷ 4 ore 110 °C	150	230÷250	50 ÷ 80	1,2 ÷ 2	30
	(c)	1000÷1800 (40+80)· P_{inj}	100 ÷ 300							
PBT		800÷1500 (50÷70)· P_{inj}	50 ÷ 100	↑ pt. g ↓ , ↓ pt. g ↑	3 ÷ 4 ore 110 °C	120	250÷265	40 ÷ 90	0,4 ÷ 0,9	20
		1000÷1800 (40+80)· P_{inj}	100 ÷ 300							
PSU		1000÷1800 (40+80)· P_{inj}	100 ÷ 300	↑ pt. g ↓ , ↓ pt. g ↑	4 ore 130 °C	200	340÷380	120÷180	0,4 ÷ 0,9	20
		1000÷1500 (40+80)· P_{inj}	100 ÷ 300							
PES		1000÷1500 (40+80)· P_{inj}	100 ÷ 300	↑ pt. g ↓ , ↓ pt. g ↑	3 ÷ 4 ore 150 °C	180	320÷340	130÷150	0,1 ÷ 0,6	30
		1000÷1500 (40+80)· P_{inj}	100 ÷ 300							

(*) corespunzătoare evitării "jetului liber" (a se vedea cap. DEFECTE)

(**) în lipsa solicițiilor mecanice

(***) numai pentru material încărcat cu apă din condensare ca urmare a condițiilor improprie de depozitare

(****) temperatura materialului în zona terminală a cilindrului de plastifiere, la ieșirea din duza de injectare a mașinii

g = grosime perete reper injectat

↑ = valoare ridicată a parametrului

↓ = valoare scăzută a parametrului

Observație: valorile din tabel sunt pentru materialul fără adaus de întărire ("ne-armat")

Informatii utile (accesate 30 sept., 2012):

www.polymerprocessing.com/polymers/class.html

www.polymerprocessing.com/polymers/alpha.html

www.itpcompany.com/info/data/index.htm

Anexa 3c

<http://www.matweb.com/> , data sheet: PP









Thermal Properties		
	Metric	English
CTE, linear	18.0 - 185 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	10.0 - 103 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
Melting Point	61.0 - 180 $^\circ\text{C}$	142 - 356 $^\circ\text{F}$
Crystallization Temperature	110 - 115 $^\circ\text{C}$	230 - 239 $^\circ\text{F}$
Maximum Service Temperature, Air	65.0 - 125 $^\circ\text{C}$	149 - 257 $^\circ\text{F}$
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	55.0 - 160 $^\circ\text{C}$	131 - 320 $^\circ\text{F}$
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	37.0 - 172 $^\circ\text{C}$	98.6 - 341 $^\circ\text{F}$
Vicat Softening Point	35.0 - 158 $^\circ\text{C}$	95.0 - 316 $^\circ\text{F}$
Minimum Service Temperature, Air	-30.0 $^\circ\text{C}$	-22.0 $^\circ\text{F}$
Britleness Temperature	-20.0 - 21.0 $^\circ\text{C}$	-4.00 - 69.8 $^\circ\text{F}$
UL RTI, Electrical	65.0 - 221 $^\circ\text{C}$	149 - 430 $^\circ\text{F}$
UL RTI, Mechanical with Impact	65.0 - 221 $^\circ\text{C}$	149 - 430 $^\circ\text{F}$
UL RTI, Mechanical without Impact	65.0 - 221 $^\circ\text{C}$	149 - 430 $^\circ\text{F}$
Flammability, UL94	HB - V-0	HB - V-0
Oxygen Index	24.0 - 30.0 %	24.0 - 30.0 %
Shrinkage	1.05 - 2.00 %	1.05 - 2.00 %

Optical Properties		
	Metric	English
Haze	0.200 - 91.0 %	0.200 - 91.0 %
Gloss	30.0 - 160 %	30.0 - 160 %
Yellow Index	0.000300 - 2.44 %	0.000300 - 2.44 %

Processing Properties		
	Metric	English
Processing Temperature	87.8 - 320 $^\circ\text{C}$	190 - 608 $^\circ\text{F}$
Feed Temperature	180 - 210 $^\circ\text{C}$	356 - 410 $^\circ\text{F}$
Rear Barrel Temperature	177 - 274 $^\circ\text{C}$	350 - 525 $^\circ\text{F}$
Middle Barrel Temperature	191 - 274 $^\circ\text{C}$	375 - 525 $^\circ\text{F}$
Front Barrel Temperature	199 - 274 $^\circ\text{C}$	390 - 525 $^\circ\text{F}$
Nozzle Temperature	204 - 243 $^\circ\text{C}$	400 - 470 $^\circ\text{F}$
Head Temperature	210 $^\circ\text{C}$	410 $^\circ\text{F}$
Mold Temperature	5.00 - 60.0 $^\circ\text{C}$	41.0 - 176 $^\circ\text{F}$
Ejection Temperature	26.7 - 54.4 $^\circ\text{C}$	80.0 - 130 $^\circ\text{F}$
Roll Temperature	40.0 - 50.0 $^\circ\text{C}$	104 - 122 $^\circ\text{F}$
Drying Temperature	60.0 - 100 $^\circ\text{C}$	140 - 212 $^\circ\text{F}$
Dry Time	1.00 - 4.00 hour	1.00 - 4.00 hour
Moisture Content	0.0500 - 1.00 %	0.0500 - 1.00 %
Injection Pressure	2.76 - 103 MPa	400 - 15000 psi
Hold Pressure	2.07 - 8.27 MPa	300 - 1200 psi
Back Pressure	0.172 - 1.03 MPa	24.3 - 150 psi

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to what was originally entered into MatWeb.

<http://www.matweb.com/> , data sheet: ABS

MatWeb - The Online Material Property Database		
Overview of materials for Ac		
www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=eb7a78f5948d481c9493a67f0d0b9646		
Cette page est en anglais - Voulez-vous la traduire? Traduire Non		
<input type="text"/> <input type="button" value="Search"/>      		
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	68.0 - 140 °C	154 - 284 °F
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	65.0 - 220 °C	149 - 428 °F
	96.0 - 96.0 °C	205 - 205 °F
	@Temperature 120 - 120 °C	@Temperature 248 - 248 °F
	94.0 - 94.0 °C	201 - 201 °F
	@Temperature 80.0 - 80.0 °C	@Temperature 176 - 176 °F
	94.0 - 94.0 °C	201 - 201 °F
	@Time 14400 - 14400 sec	@Time 4.00 - 4.00 hour
Vicat Softening Point	45.0 - 135 °C	113 - 275 °F
Heat Distortion Temperature	85.0 - 85.1 °C	185 - 187 °F
Glass Transition Temp, Tg	105 - 109 °C	221 - 228 °F
UL RTI, Electrical	60.0 - 80.0 °C	122 - 176 °F
UL RTI, Mechanical with Impact	60.0 - 80.0 °C	122 - 176 °F
UL RTI, Mechanical without Impact	60.0 - 80.0 °C	122 - 176 °F
Flammability, UL94	HB - 5VA	HB - 5VA
Oxygen Index	19.0 - 30.0 %	19.0 - 30.0 %
Glow Wire Test	650 - 960 °C	1200 - 1760 °F
Optical Properties		
	Metric	English
Gloss	25.0 - 96.7 %	25.0 - 96.7 %
Transmission, Visible	0.000 - 88.0 %	0.000 - 88.0 %
Processing Properties		
	Metric	English
Processing Temperature	160 - 274 °C	320 - 525 °F
Rear Barrel Temperature	149 - 250 °C	300 - 482 °F
Middle Barrel Temperature	177 - 255 °C	350 - 491 °F
Front Barrel Temperature	191 - 260 °C	375 - 500 °F
Nozzle Temperature	191 - 274 °C	375 - 525 °F
Mold Temperature	10.0 - 85.0 °C	50.0 - 185 °F
Injection Velocity	200 - 240 mm/sec	7.87 - 9.45 in/sec
Drying Temperature	70.0 - 93.3 °C	158 - 200 °F
Dry Time	2.00 - 24.0 hour	2.00 - 24.0 hour
Moisture Content	0.0100 - 0.150 %	0.0100 - 0.150 %
Dew Point	-29.0 - -17.8 °C	-20.2 - 0.000 °F
Injection Pressure	4.14 - 130 MPa	600 - 18900 psi
Back Pressure	0.000 - 2.00 MPa	0.000 - 290 psi
Clamp Pressure	30.8 - 69.0 MPa	4470 - 10000 psi
Shot Size	30.0 - 80.0 %	30.0 - 80.0 %
Vent Depth	0.00380 - 0.00760 cm	0.00150 - 0.00299 in
Cushion	0.317 - 0.635 cm	0.125 - 0.250 in
Screw Speed	25.0 - 100 rpm	25.0 - 100 rpm
<small>Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to Mat were originally entered into MatWeb.</small>		

<http://www.matweb.com/>, data sheet: PC

CTE, linear	15.0 - 117 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	8.33 - 65.0 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
CTE, linear, Transverse to Flow	33.0 - 76.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	18.3 - 42.2 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
Specific Heat Capacity	1.20 - 1.70 $\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$	0.287 - 0.406 $\text{BTU}/\text{lb}\cdot^\circ\text{F}$
Thermal Conductivity	0.163 - 0.290 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	1.13 - 2.01 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$
Maximum Service Temperature, Air	116 - 135 $^\circ\text{C}$	240 - 275 $^\circ\text{F}$
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	98.0 - 208 $^\circ\text{C}$	208 - 406 $^\circ\text{F}$
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	77.8 - 187 $^\circ\text{C}$	172 - 369 $^\circ\text{F}$
Vicat Softening Point	100 - 218 $^\circ\text{C}$	212 - 424 $^\circ\text{F}$
Glass Transition Temp, Tg	143 - 152 $^\circ\text{C}$	289 - 306 $^\circ\text{F}$
UL RTI, Electrical	75.0 - 130 $^\circ\text{C}$	167 - 266 $^\circ\text{F}$
UL RTI, Mechanical with Impact	75.0 - 130 $^\circ\text{C}$	167 - 266 $^\circ\text{F}$
UL RTI, Mechanical without Impact	75.0 - 130 $^\circ\text{C}$	167 - 266 $^\circ\text{F}$
Flammability, UL94	HB - 5VA	HB - 5VA
Oxygen Index	24.0 - 35.0 %	24.0 - 35.0 %
Glow Wire Test	750 - 960 $^\circ\text{C}$	1380 - 1760 $^\circ\text{F}$

Optical Properties	Metric	English
Refractive Index	1.58 - 1.59	1.58 - 1.59
Haze	0.500 - 1.10 %	0.500 - 1.10 %
Gloss	90.0 %	90.0 %
Transmission, Visible	78.0 - 91.0 %	78.0 - 91.0 %

Processing Properties	Metric	English
Processing Temperature	227 - 343 $^\circ\text{C}$	441 - 650 $^\circ\text{F}$
Rear Barrel Temperature	210 - 338 $^\circ\text{C}$	410 - 640 $^\circ\text{F}$
Middle Barrel Temperature	221 - 338 $^\circ\text{C}$	430 - 640 $^\circ\text{F}$
Front Barrel Temperature	227 - 371 $^\circ\text{C}$	441 - 700 $^\circ\text{F}$
Nozzle Temperature	227 - 343 $^\circ\text{C}$	441 - 650 $^\circ\text{F}$
Mold Temperature	54.4 - 160 $^\circ\text{C}$	130 - 320 $^\circ\text{F}$
Ejection Temperature	130 - 200 $^\circ\text{C}$	266 - 392 $^\circ\text{F}$
Injection Velocity	200 mm/sec	7.87 in/sec
Drying Temperature	70.0 - 130 $^\circ\text{C}$	158 - 266 $^\circ\text{F}$
Dry Time	2.00 - 48.0 hour	2.00 - 48.0 hour
Moisture Content	0.0200 - 0.0400 %	0.0200 - 0.0400 %
Dew Point	-28.9 $^\circ\text{C}$	-20.0 $^\circ\text{F}$
Injection Pressure	5.52 - 152 MPa	800 - 22000 psi
Back Pressure	0.345 - 1.38 MPa	50.0 - 200 psi
Clamp Pressure	27.6 - 69.0 MPa	4000 - 10000 psi
Shot Size	30.0 - 80.0 %	30.0 - 80.0 %
Vent Depth	0.00250 - 0.00760 cm	0.000984 - 0.00299 in
Screw Speed	20.0 - 100 rpm	20.0 - 100 rpm

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's original data for more information.

Anexa 4



Standard temperatures and loads according ASTM D -1238.

Standard Condition	Temperature °C	Load, incl. piston kg	appr. pressure	
			k Pa	psi
125/0.325	125	0.325	44.8	6.5
125/2.16	125	2.16	298.2	43.25
150/2.16	150	2.16	298.2	43.25
190/0.325	190	0.325	44.8	6.5
190/2.16	190	2.16	298.2	43.25
190/21.60	190	21.60	2982.2	432.5
200/5.0	200	5.0	689.5	100.0
230/1.2	230	1.2	165.4	24.0
230/3.8	230	3.8	524.0	76.0
265/12.5	265	12.5	1723.7	250.0
275/0.325	275	0.325	44.8	6.5
230/2.16	230	2.16	298.2	43.25
190/1.05	190	1.05	144.7	21.0
190/10	190	10.0	1379.0	200.0
300/1.2	300	1.2	165.4	24.0
190/50	190	5.0	689.5	100.0
235/1.0	235	1.0	138.2	20.05
235/2.16	235	2.16	298.2	43.25
235/5.0	235	5.0	689.5	100.0
250/2.16	250	PA? 2.16	298.2	43.25
310/12.5	310	12.5	1723.7	250.0
210/2.16	210	2.16	298.2	43.25
285/2.16	285	2.16	298.2	43.25
315/5.0	315	5.0	689.5	100.0
372/2.16	372	2.16	298.2	43.25
372/5.0	372	5.0	689.5	100
297/5.0	297	5.0	689.5	100
230/21.6	230	21.6	2982.2	432.5
230/5.0	230	5.0	689.5	100
265/21.6	265	21.6	2982.2	432.5
265/31.6	265	31.6	4361.2	632.5
271.5/2.16	271.5	2.16	298.2	43.25
220/10	220	10	1379.0	200.0
250/1.2	250	1.2	165.4	24.0
265/3.8	265	3.8	524.0	76.0
265/5	265	5.0	689.5	100.0

Table 4

Anexa 5



8.7 Test conditions

Conditions in use for the designation of standards for thermoplastic materials.

Standard	Polymer	Condition Code	Temperature °C	nominal Load kg
ISO 1622-1 •	PS ✓	H	200	5,00
ISO 1872-1 •	PE ✓	D	190	2,16
ISO 1872-1 •	PE	E	190	0,325
ISO 1872-1	PE	G	190	21,6
ISO 1872-1 •	PE	T	190	5,00
ISO 1873-1 •	PP ✓	M	230	2,16
ISO 2580-1(•)	ABS ✓	U	220	10,00
ISO 2897-1 •	PS-I ✓	H	200	5,00
ISO 4613-1 •	E-VAC	B	150	2,16
ISO 4613-1 •	E-VAC	D	190	2,16
ISO 4613-1 •	E-VAC	Z	125	0,325
SO 4894-1 (•)	SAN	U	220	10,00
	ASA			
ISO 6402-1	ACS	U	220	10,00
	AES			
ISO 7391-1 •	PC ✓	W	300	1,20
ISO 8257-1	PMMA	N	230	3,80
ISO 8986-1 •	PB	D	190	2,16
SO 8986-1 (•)	BP	F	190	10,00
SO 9988-1 •	POM ✓	D	190	2,16
ISO 10366-1(•)	MABS	U	220	10,00

EVAC = ethylene - vinyl - acetate - Copolymer

Table 1

ASTM D-1238		
Melt Mass-Flow Rate (MFR) g/10 min.	Mass of test sample in cylinder	Extrudate cutting interval in min.
0.15 ... 1.0	2.5 ... 3.0	6.00
> 1.0 ... 3.5	3.0 ... 5.0	3.00
> 3.5 ... 10	4.0 ... 8.0	1.00
> 10 ... 25	4.0 ... 8.0	0.50
> 25 ... 50	4.0 ... 8.0	0.25

Table 2

ISO 1133		
Melt Mass-Flow Rate (MFR) g/10 min. ¹⁾	Mass of test sample in cylinder ²⁾	Extrudate cutting interval in s.
≥ 0.1 but ≤ 0.5	3 to 5	240
> 0.5 but ≤ 1	4 to 6	120
> 1 but ≤ 3.5	4 to 6	60
> 3.5 but ≤ 10	6 to 8	30
> 10 ⁴⁾	6 to 8	5 to 15 ³⁾

- 1) It is recommended that a melt flow rate should not be measured if the value obtained in this test is less than 0.1 g/10 min. (MFR) or 0.1 ccm/10 min (MVR). Melt mass flow rates greater than 100 g/10 min. may only be measured if the timer resolution is 0.01 second and method B is used. Alternatively a half-height and half-diameter die (nozzle) may be used.
- 2) When the density of the material is greater than 1.0 g/ccm, it may be necessary to increase the mass of the test portion. Use the low mass values for low density materials.
- 3) Sample mass is a significant factor in determining the repeatability of this test and may need to be controlled to 0,1 g to reduce variability between runs.
- 4) To achieve adequate repeatability when testing materials having an MFR greater than 25 gr/10 min. (or MVR greater than 25 ccm/10 min.) it may be necessary either to control and measure cut-off intervals to an accuracy of less than 0,1 sec or to use procedure B of the ISO 1133..

Table 3

E. KARG Industrietechnik, Justus-von-Liebig-Ring 15, D-82152 Krailling - Germany, Tel. (+49) (0)89 7552013, Fax. (+49) (0)89 752133