

# **STUDIUL CURGERII MATERIALULUI PLASTIC PRIN REȚELE ȘI CAVITĂȚI CU APLICAȚIE LA MICROINJECTARE**

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

**Ing. ROTAR Ioan Daniel**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing Tudor Alexandru Iclănzan  
prof.univ.dr.ing. Gheorghe Achimaș  
prof.univ.dr.ing. Horațiu Iancău  
conf.univ.dr.ing. George Belgiu

Ziua susținerii tezei: 30 Septembrie 2011

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2011

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

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

## *Cuvânt înainte*

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației al Universității „Politehnica” din Timișoara, la Catedra de Tehnologia Construcțiilor de Mașini în perioada 2007-2011.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat Prof.Dr.Ing. Tudor Alexandru **ICLĂNZAN** pentru sprijinul, suportul, disponibilitatea, timpul acordat și îndrumările pe care le-a oferit în tot acest timp de patru ani în care a fost elaborată prezenta lucrare de doctorat.

În realizarea cercetărilor doctorale am găsit înțelegere și sprijin în special în cadrul Catedrei de TCM. Aduc mulțumiri speciale șefului de catedră D-I Conf. Dr. Ing. Dănuț Șoșdean pentru înțelegerea, sprijinul și suportul acordat pe parcursul celor patru ani de activitate în elaborarea tezei. Colegilor de la Plasturgie țin să le mulțumesc în mod deosebit pentru îndrumările și sprijinul acordat în tot acest timp: D-lui Conf. Dr. Ing. Daniel Stan, D-lui Conf. Aurel Tulcan, Conf. Dr. Ing. Turc Cristian, D-lui Asist. Florin Ferician, colegilor mai tineri: Asist. Dr. Ing. Adrian-Ilie Dume și colegilor mei de birou Iancu Șerban și Vlad Țut. Un ultim omagiu și mulțumiri deosebite doresc să prezint fostului nostru coleg D-I Conf. Dr. Ing. Valentin Seiculescu, care mi-a oferit tot sprijinul de care aveam nevoie în prima parte a lucrării elaborate și m-a îndrumat în diverse momente critice de pe parcursul realizării prezentei lucrări. Mulțumiri speciale doresc să aduc colegilor S.L. Dr. Ing. Cristian Cosma și Cristian Cioană pentru zecile de ore petrecute în laborator alături de mine atunci când au fost realizate pastilele amovibile respectiv matrița pe mașinile de frezat ISEL. În acest sens doresc să mai mulțumesc D-lui Conf. Dr. Ing. Grosu Florin pentru sprijinul acordat în partea practică a lucrării și totodată D-lui tehnician principal Alfred Kraussz respectiv D-lui Ing. Dan Balmez pentru ajutorul oferit privind materialele de prelucrat. Mulțumiri speciale țin să aduc d-lui Conf. Dr. Ing George Belgiu pentru îndrumările, sugestiile și observațiile critice uneori făcute pe partea de conținut și redactare a tezei de doctorat și pentru sprijinul acordat privind softurile utilizate și colaborarea cu o firmă specializată în domeniul injectării (ESSER) din Timișoara, fără de care probabil că această teză nu ar fi putut fi finalizată. De asemenea țin să mulțumesc și colegului de doctorat Stef Dorian precum și D-lui S.L. Dr. Ing. But Adrian pentru sprijinul acordat. Mulțumesc colegului S.L. Dr. Ing. Cosmin Codrean din cadrul departamentului pentru ajutorul și răspunsul prompt atunci când am avut nevoie de încercările la duritate privind plăcile de matriță.

Mulțumiri deosebite și recunoștință doresc să aduc D-lui Director Executiv Gheorghe CAZAN de la firma HOFAG Engineering pentru sprijinul acordat privind acceptul utilizării programului de analiză de curgere Autodesk MoldFlow precum și D-nei Dir. Ioana Țârcomnicu de la firma Inas S.A. pentru softul Moldex 3D. Doresc să aduc mulțumiri speciale colaboratorilor și grupului de ingineri de la firma ESSER din Timișoara și în special D-lui Ing. Mihai Coste pentru sprijinul acordat în urma căruia a fost elaborată o ultimă parte a tezei astfel încât lucrarea să aibă aplicabilitate în domeniul uzinal.

Timișoara, Septembrie 2011

ROTAR Ioan Daniel

Rotar, Ioan Daniel

**Studiul curgerii materialului plastic prin rețele și cavități cu aplicație la microinjectare.**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 39, Editura Politehnica, 2011, 252 pagini, 133 figuri, 23 tabele, ISSN:1842-8967, ISBN:978-606-554-361-4

Cuvinte cheie:

reologie, injectare matrițe de injectat, microinjectare, curgere, materiale plastice, rețele, cavități, pastile amovibile.

Rezumat

Microinjectarea reprezintă unul dintre procedeele moderne de obținere a pieselor sau reperelor miniaturale din materiale polimerice. La nivel comparativ cu injectarea convențională acest procedeu prezintă o serie de asemănări dar și deosebiri demne de luat în seamă cum ar fi: utilizarea unor scule, dispozitive sau piese de dimensiuni reduse în procesul de fabricare a matriței, folosirea în procesul injectării a unei temperaturi apropiate de temperatura de vitrifiere pentru temperarea matriței, o forță de închidere a mașinii mai mică de 15 tone, un diametru al digului mai mic de 1mm, folosirea unui melc sau piston de plastifiere al mașinii de injectat sub un diametru de 20mm, răcire a piesei instantanee și folosirea unui calcul 3D la simularea curgerii utilizând un soft adecvat.

În contextul de mai sus obiectivul prezentei teze de doctorat a fost acela de a studia procedeul de microinjectare cu tot ceea ce implică acesta, curgerea materialelor plastice prin rețele și cavități pentru piese miniaturale utilizând un soft specific (Autodesk MoldFlow) precum și realizarea unor elemente active din pastile amovibile și a unei matrițe destinate procesului de microinjectare. Problema curgerii prin rețele a fost realizată din două direcții de cercetare aceea de a studia rețelele cu diametre sub 3mm respectiv din punctul de vedere al vâscozității de material. Pe lângă simulările de curgere privind rețelele de injectat au fost realizate o serie de simulări de curgere pentru modele referențiale din diverse domenii de interes.

Cercetările de simulare realizate pe rețelele de injectat sunt validate în proporție de 98% de rezultatele pozitive obținute pentru materialele cu vâscozitate ridicată respectiv scăzută. De asemenea cercetările teoretice sunt validate de aplicabilitatea în industrie în cazul realizării matriței cu piese specifice industriei electronice de tip conectori.

Cercetările autorului pentru realizarea elementelor active ale matrițelor de microinjectat din pastile amovibile au darul să ofere o cale de dezvoltare în viitor a cercetărilor și aplicațiilor în domeniu.



## CUPRINS

Notații, abrevieri,acronime	8
Introducere	10
Capitolul I – NOȚIUNI FUNDAMENTALE DE REOLOGIE ȘI PROPRIETĂȚI DE CURGERE A MATERIALELOR POLIMERICE.	
1.1. Considerații privind reologia materialelor polimerice	13
1.2. Caracteristici ale fenomenului reologic.	16
1.3. Fluide Newtoniene. Fluide nonnewtoniene.	21
1.3.1. Fluidele Newtoniene. Corelații/Formule matematice.	27
1.3.1.1.Fluidele Newtoniene incompresibile.	29
1.3.1.2.Curgerea plană Poiseuille.	32
1.3.1.3.Curgerea Hagen-Poiseuille.	33
1.3.1.4.Ecuția energiei pentru un fluid Newtonian.	33
1.3.1.5.Fluide newtoniene compresibile.	36
1.3.2. Fluidele nonnewtoniene. Definiție. Caracteristici definitorii.	37
1.3.2.1.Modele de vâscozitate non-newtoniene.	38
1.3.2.2.Curgerea izotermală în canale la fluidele non-newtoniene	39
1.3.2.3.Fluidul linear a lui Maxwell	40
1.4. Modelarea matematică și modele non-newtoniene.	42
1.4.1. Definiție. Caracteristicile modelării matematice.	43
1.4.2. Modelul Navier-Stokes.	43
1.4.3. Modelul fluidului vâscos non-newtonian.	44
1.4.4. Modelul Hele-Shaw	45
1.4.5. Modelul lui Ostwald de Waele	48
1.5. Concluzii.	49
Capitolul. II.-CURGEREA MATERIALELOR TERMOPLASTICE PRIN REȚELELE ȘI CAVITĂȚILE MATRIȚELOR.	
2.1. Tipuri de polimeri.	50
2.2. Caracteristici ale curgerii topitului materialelor polimerice în matriță.	54
2.3. Modificări de structură a polimerilor la procesarea prin injectare.	57
2.3.1. Condițiile termodinamice specifice injectării în matriță.	57
2.3.2. Relaxarea și ruperea lanțului molecular al polimerilor	61
2.4. Factorii care pot influența modificările de structură a polimerilor în procesul injectării	62
2.5. Rețele utilizate în procesul de injectare.	66
2.5.1. Noțiuni privind rețelele de injectare.	66
2.5.2. Componenta rețelelor de injectat.	66
2.5.3. Tipuri de rețele de injectat.	71
2.6. Tipuri de diguri utilizate la injectarea materialelor termoplastice.	74
2.7. Concluzii.	84

Capitolul III.-MICROINJECTAREA. PARTICULARITĂȚI ȘI APLICAȚII ALE PROCESULUI DE MICROINJECTARE.	
3.1. Microinjectarea. Noțiuni introductive și caracteristici.	85
3.1.1. Definiție. Prezentare generală.	85
3.1.2. Particularitățile procesului.	86
3.1.3. Diferențe față de injectarea tradițională.	89
3.1.4. Cerințe restrictive ale microinjectării.	91
3.1.4.1. Materiale utilizate la microinjectare.	91
3.1.4.2. Matrița sau scula pentru microinjectare.	93
3.1.4.2.1. Rețeaua.	94
3.1.4.2.2. Cavitatea.	95
3.1.4.2.3. Ventilația și răcirea matriței la microinjectare.	96
3.1.4.3. Mașini de injectat specifice procesului de microinjectare și caracteristicile acestora.	97
3.2. Particularități ale sculelor destinate uzinării matrițelor pentru microinjectare	101
3.2.1. Scule destinate îndepărtării materialului prin așchiere pentru microcavități.	102
3.2.2. Procedee de prelucrare a microcavităților	104
3.3. Domenii de aplicabilitate a pieselor obținute prin microinjectare.	106
3.3.1. Industria automotive	106
3.3.2. Industria aerospațială/aeronautică	107
3.3.3. Industria electronică.	107
3.3.4. Industria militară.	110
3.3.5. Industria optică.	110
3.3.6. Industria medicală.	113
3.3.7. Industria recreațională/jucăriilor.	114
3.4. Concluzii.	115
Capitolul. IV. - OBIECTIVUL CERCETĂRII DOCTORALE	116
Capitolul. V.-REALIZAREA UNEI PLATFORME EXPERIMENTALE PENTRU MICROINJECTARE	
5.1 Noțiuni privind concepția unei matrițe	118
5.1.1. Elementele componente principale ale unei matrițe.	122
5.1.2. Factori ce influențează concepția matrițelor.	123
5.2. Proiectarea matrițelor în medii CAD.	123
5.2.1. Proiectarea clasică.	123
5.2.2. Proiectarea cu ajutorul elementelor standardizate.	124
5.3. Concepția și realizarea unor pastile destinate microinjectării.	125
5.4. Rețele pentru microinjectare.	129
5.5. Proiectarea unor modele referențiale	135
5.6. Concluzii.	142
Capitolul. VI.-SIMULAREA CURGERII ÎN PROCESUL MICROINJECTĂRII UTILIZÂND MEDIUL CAE	
6.1. Noțiuni privind mediul CAE	143
6.2. Analiza cu element finit	144
6.3. Programe destinate simulării curgerii materialului plastic	147
6.3.1 Caracteristicile programului Autodesk MoldFlow.	147
6.3.2 VisiFlow. Caracteristici.	151

6.3.3	Simpoe. Caracteristici.	152
6.3.4	Moldex3D caracteristici.	153
6.4.	Simularea curgerii prin rețele și cavități în mediul CAE.	153
6.4.1.	Simularea curgerii prin rețele în mediul MoldFlow	154
6.4.2.	Simularea curgerii în cazul modelelor referențiale în mediul Autodesk MoldFlow	170
6.5.	Concluzii.	189
<b>Capitolul. VII.-PARTICULARITĂȚI ÎN FABRICAȚIA UNEI MATRIȚE EXPERIMENTALE</b>		
7.1.	Scule și mașini unelte utilizate	190
7.2.	Realizarea unei matrițe prototip din material polimeric	193
7.3.	Fabricarea diverselor tipuri de pastile amovibile	197
7.4.	Fabricarea unei matrițe cu pastile amovibile	210
7.5.	Realizarea unei matrițe specifice industriei electronice-conectori	211
7.6.	Concluzii.	216
<b>CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE</b>		217
<b>ANEXE</b>		
Anexa.1.1-	Tabel cu tipuri de vâscozitate pentru diferite materiale Polimerice	219
Anexa.2.1-	Viteza frontului de curgere pentru o serie de materiale polimerice	220
Anexa.3.1-	Tabel reprezentativ al lungimilor maxime de rețea în funcție de vâscozitatea materialului în cazul injectării convenționale	221
Anexa.3.2-	Mașini pentru microinjectat și caracteristicile acestora.	222
	Forța de închidere pentru diverse mașini de injectat	223
Anexa.3.3-	Mașini specializate pentru microinjectare și caracteristicile acestora conform bazei de date MoldFlow 2010	224
Anexa.5.1-	Tabel reprezentativ al lungimilor maxime de rețea în funcție de vâscozitatea materialului în cazul microinjectării	226
Anexa.5.2-	Vedere explodată a ansamblului matriței proiectate pentru microinjectare	227
Anexa.6.1-	Materiale polimerice utilizate în simulările realizate în mediul MoldFlow și caracteristici de procesare a acestora	228
Anexa.6.2-	Proprietăți reologice ale materialelor polimerice cu vâscozitate scăzută	231
	Diagrama PVT pentru materialele cu vâscozitate scăzută	232
Anexa.6.3-	Rezultate obținute la simulările de curgere prin rețele utilizând materialele polimerice cu vâscozitate scăzută	233
Anexa.6.4-	Modele referențiale din industria IT	236
Anexa.6.5-	Simulări de curgere pentru matrițe cu mai multe cuiburi	239
<b>BIBLIOGRAFIE</b>		242

### **Notății, abrevieri, acronime**

$\eta$  - vâscozitatea [Pa·s] sau [kg/m·s]  
 $\tau$  - efortul unitar la forfecare [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\gamma$  - lunecarea specifică [1/s]  
 $\mu$  - vâscozitatea dinamică [N·s/m<sup>2</sup>]  
 $\nu$  - vâscozitatea cinematică [m<sup>2</sup>/s]  
 $\nabla\varphi$  - gradientul unei funcții scalare  
 $\varepsilon$  - energia interioară pe unitatea de masă  
 $\rho$  - densitatea fluidului care curge  
 $\sigma$  - viteza/tensorul la forfecare  
A x B - dimensiunile active ale platourilor mașinii de injectat  
CAM - Computer-Aided Manufacturing  
CAD - Computer-Aided Design  
CAE - Computer-Aided Engineering  
D - diametrul secțiunii rețelei de injectat  
D<sub>H</sub> - diametru hidraulic  
d<sub>0</sub> - diametrul duzei de injectare în matrită funcție de masa piesei  
d<sub>2</sub> - diametrul digului celei de-a doua cavități, (in. sau cm )  
D<sub>R</sub> - diametrul rețelei  
D<sub>p</sub> - diametrul canalului principal  
D<sub>s</sub> - diametrul canalului secundar  
F<sub>i</sub> - forța maximă de închidere pe care o poate dezvolta utilajul  
F<sub>i</sub> - forța maximă de închidere dezvoltată de mașina de injectare  
FEM - finite element method  
G - capacitatea reală de plastifiere a mașinii de injectat,  
I<sub>C</sub> - indicele de curgere (melt index)  
k - coeficient de corecție  
L - lățimea canalului de distribuție  
M - masa unei piese injectate, [g]  
MPA - MoldFlow Plastic Advanced  
MPI - MoldFlow Plastic Insight  
Mc - masa moleculară  
N - numărul de ramificații într-o rețea  
n - numărul de cuiburi în matrită  
NC - comandă numerică  
 $p$  - presiune termodinamică  
PDI - indicele de polidispersie  
 $p_i$  - presiunea topiturii de polimer  
 $p_{inj}$  - presiunea de injectare prescrisă pentru materialul procesat [daN/cm<sup>2</sup>],  
Q - debitul  
Re - numărul lui Reynolds  
S<sub>max</sub> - grosimea maximă a peretelui piesei injectate  
S<sub>c</sub> - suprafața frontală a cuibului, [cm<sup>2</sup>]  
T - tensor de stres (isotropic)

$T'_{ij}$  - tensor de stres vâscos  
 $T_V$  - temperatura de vitrifiere [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_C$  - temperatura de curgere [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_b$  - temperatura de fragilizare [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_t$  - temperatura de topire [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_d$  - temperatura de degradare termică [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_g$  - temperatura de tranziție vitroasă [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_m$  - temperatura de topire cristalină [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_i$  - temperatura de injectare [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $t$  - durată completă a unui ciclu de injectare, [s]  
 $t_1$  - adâncimea digului în prima cavitate, (in sau cm)  
 $t_2$  - adâncimea digului în a doua cavitate, (in sau cm)  
 $V$  - volumul specific  
 $V_p$  - volumul piesei  
 $V_{inj}$  - volumul maxim de material plastifiat necesar la o injectare,  
 $W_1$  - volumul piesei din prima cavitate, (oz sau grame)  
 $W_2$  - volumul piesei din a doua cavitate (oz sau grame)

ASA - acrilonitril stiren acrilat  
 ABS - acrilonitril butadien stiren  
 CA - acetat de celuloză  
 COP - polimerul ciclo-olefin  
 HDPE - polietilena de înaltă densitate  
 HFP - et-TFE - hexafluorpropilena-tetrafluoretilena-etilenapoliciclohilen  
 HIPS - polistiren modificat pentru a oferi rezistență la impact  
 LCP - polimer pe bază de cristale lichide  
 LDPE (LLDPE) - polietilenă de joasă densitate  
 PA6 (PA6.6) - poliamidă  
 PBT - polibutadientereftalat  
 PC/ABS - amestec de policarbonat și acrilonitril-butadien-stiren  
 PCT - policiclohexilen tereftalat  
 PE - polietilenă  
 PEEK - polieterestercetonă  
 PET - polietilen tereftalat  
 PMMA - polimetacrilat de metil  
 POM - poliacetal (polioximetilen)  
 PP - polipropilenă  
 PPS - polifenilensulfură  
 PS - polistiren  
 PSU - polisulfonă  
 PVC - policlorură de vinil  
 SAN- copolimer stiren-acrilonitril  
 SB - stiren butadien  
 SBC - stiren butadien copolimer  
 TPO - poliolefină termoplastică  
 TPC-ET - poliester elastomer termoplastic

## ***Introducere***

Procedul de microinjectare reprezintă în zilele noastre un proces inovativ, de actualitate, în rând cu tehnologiile moderne de obținere a reperelor din materiale polimerice utilizate în industriile actuale. Acest procedeu a luat amploare în anii 90 în America, Germania și Japonia și adevăratele realizări la acea vreme au fost minimalizarea diferitelor produse din domeniul militar (telefoane, stații de emisie recepție, elemente de stocare a datelor etc) pe care astăzi le putem găsi în comerț fără prea mari probleme. În general este vorba de industria electronică respectiv a telecomunicațiilor care a fost dezvoltată în decursul acestor ani și continuă să aibă o ascendență uimitoare în dezvoltare pe zi ce trece.

Procedul este utilizat la scară largă în țările producătoare de asemenea componente și prezintă un real interes pentru persoanele din cercetare respectiv din industrie tocmai datorită faptului că există o tendință nestăvilă de a minimaliza produsele din jurul nostru. Astfel telefonia mobilă s-a dezvoltat foarte mult în ultimii ani în acest sens urmată de industria IT unde se încearcă depășirea actualelor limite în domeniul elementelor componente ale plăcilor de circuit integrat care formează diversele aparate electronice și electrocasnice care ne înconjoară. Astfel inginerii se străduiesc să minimalizeze tot ceea ce se poate în majoritatea domeniilor datorită unei cereri tot mai mare a ceea ce oferă confort, spațiu de depozitare cât mai mic, robustețe și eleganță. Aceste proprietăți pot fi întărite de următoarele exemple din industria auto sau a telecomunicațiilor: toată lumea își dorește nespuse de mult să aibă o mașină elegantă, rapidă confortabilă d.p.d.v. al spațiului dar cu accesorii mici care să ofere satisfacție nevoilor pentru care au fost create, mică în dimensiuni să te poți strecura ușor în trafic etc sau un telefon mobil care să fie performant datorită opțiunilor privind capacitate de stocare, rapiditatea unui transfer de date, acces rapid la internet, baterie cu durată de funcționare ridicată ș.a. Desigur că în acest mod exemplele pot continua la nesfârșit.

Problema care se pune în acest domeniu pleacă de la premisa că în viitor lucrurile din jurul nostru se vor dori a fi cât mai mici ceea ce face ca cererea să fie mai mare decât oferta fapt ce nu poate decât să bucure pe cei care lucrează în acest domeniu și care poate fi benefic .p.d.v. financiar.

La noi în țară cunoștințele privind acest domeniu sunt precare deoarece majoritatea centrelor universitare și nu numai lucrează cu piese din material polimeric , utilaje și scule de dimensiuni "normale". Piese normale sunt considerate piese ce au o greutate peste un gram și dimensiuni ce depășesc un volum de  $1\text{cm}^3$ , utilajele normale (mașini de frezat sau centre cu comandă numeric, mașini de injectat etc) sunt considerate utilaje cu o greutate ce depășește deseori 500kg sau câteva tone și lucrează cu scule specific normale. Pentru a explica mai bine ceea ce am dorit să pun în evidență este faptul că în cazul procedurii de microinjectare mașinile de injectat pot să aibă 50kg sau chiar mai puțin, iar sculele pentru prelucrarea cavităților de matriță pe mașini de frezat de exemplu nu pot fi încadrate în limitele normale dacă sunt sub 1mm. Pentru astfel de scule care pot să aibă diametre de prelucrare sub 1mm sunt necesare cunoștințe specializate privind regimurile de funcționare respectiv vitezele la care aceste scule pot fi exploatate.

Producătorii de mașini de injectat din domeniul microinjectării sunt evazivi la informațiile sau explicațiile pe care sunt determinați uneori să le ofere publicului

privind tehnologiile utilizate. În aceeaș manieră se comportă și producătorii de mașini cu comenzi numerice sau producătorii de scule miniaturale destinate prelucrării de microcavități specifice procesului de microinjectare.

În conformitate cu problemele și nevoile referitoare la acest domeniu de mare interes **obiectivul prezentei teze de doctorat a fost acela de a studia procedeul de microinjectare cu tot ceea ce implică acesta, curgerea materialelor plastice prin rețele și cavități pentru piese miniaturale din diverse domenii utilizând un soft specializat, realizarea unor pastile amovibile și a unei matrițe destinate procesului microinjectării.**

Pentru rezolvarea obiectivului propus a fost nevoie de utilizarea unui soft specializat în realizarea unor simulări de curgere (Moldflow), a unor softuri, scule, mașini și utilaje din laboratorul de Prototipare Rapidă, TCM și Plasturgie precum și achiziționarea diverselor produse din fonduri proprii sau diverse granturi.

Teza de doctorat cuprinde 7 capitole la care au fost atașate și documentații de tip anexă (anexa1-anexa7).

Capitolul I intitulat **”Noțiuni fundamentale de reologie și proprietăți de curgere a materialelor polimerice”** prezintă aspecte teoretice privind reologia materialelor polimerice cu punerea în evidență a comportării curgerii nonnewtoniene. Sunt enumerate și prezentate o serie de modele privind curgerea newtoniană și nonnewtoniană punându-se accent în special pe cea din urmă datorită faptului că topitura de polimeri are o asemenea comportare. Se face o trecere în revistă a ceea ce înseamnă modelare matematică deoarece modelele prezentate sunt suportul în baza căruia programul specific simulărilor de curgere poate genera rezultatele dorite.

În capitolul II intitulat **”Curgerea materialelor termoplastice prin rețelele și cavitățile matrițelor”** sunt prezentate noțiuni privind tipul materialelor polimerice, comportamentul și condițiile termodinamice la curgere al acestora și diverși factori care pot să influențeze materialul polimeric în procesul injectării. De asemenea capitolul prezintă noțiuni privind rețelele de injectat, tipul acestora și elementele componente ale acestora. Un alt aspect prezentat în acest capitol îl reprezintă diversele informații oferite cu privire la tipurile de diguri utilizate la injectare și importanța acestora în studiul reologic al curgerii.

Noțiunile introductive despre procesul de microinjectare, diferențele față de injectarea convențională, cerințele restrictive și particularitățile procesului sunt prezentate în capitolul III intitulat **” Microinjectarea. Particularități și aplicații ale procesului de microinjectare”**. Capitolul prezintă o serie de mașini specifice procesului de microinjectare precum și diverse particularități privind sculele (frezele) utilizate la prelucrarea de microcavități. De asemenea în acest capitol sunt exemplificate domeniile de aplicabilitate a pieselor realizate prin procedeul de microinjectare cu o serie de imagini evidente ale unor piese utilizate de cea mai mare parte dintre noi.

Capitolul IV intitulat **”Obiectivul cercetării doctorale”** prezintă în mai puțin de două pagini modul de abordare al problemei microinjectării, care este metodologia de lucru pentru rezolvarea problemelor propuse în cadrul tezei și descrierea platformei operaționale/experimentale existente în cadrul Universității Politehnica din Timișoara, secția Mecanică la Catedra de Tehnologia Construcțiilor de Mașini.

Capitolul V care se intitulează **”Realizarea unei platforme experimentale pentru microinjectare”** prezintă la început noțiuni elementare privind concepția și proiectarea unei matrițe medii CAD prin metode clasice sau moderne în care softul utilizat dispune de elemente standardizate specifice matrițelor pentru injectat. O

abordare specifică titlului tezei o reprezintă încercarea proiectării unor pastile care să fie destinate procesului de microinjectare. Mai exact se urmărește proiectarea unor pastile amovibile destinate implementării pe o matriță experimentală pentru microinjectare. Desigur, așa cum logica o cere dacă sunt proiectate pastilele cu microcavități este necesar să se proiecteze și matrița pe care se dorește a fi acestea utilizate. Prin urmare sunt proiectate două modele de matriță pentru microinjectare dintre care se va alege una pentru uzinare.

În capitolul VI al lucrării intitulat "**Simularea curgerii în procesul microinjectării utilizând mediul CAE**" sunt prezentate noțiunile teoretice privind analiza cu element finit și caracteristicile programelor destinate simulării curgerii materialelor polimerice (MoldFlow, VisiFlow, Simpoe și Moldex3D). Deoarece astfel de programe prezintă un cost ridicat și este nevoie de cunoștințe specializate pentru utilizarea lor, singurul acceptabil la ora respectivă a fost MoldFlow. Din titlul tezei de doctorat intitulat "Studiul curgerii materialului plastic prin rețele și cavități cu aplicație la microinjectare și piese cu pereți subțiri" autorul a perceput tipul de simulări în două moduri: simulări realizate pe rețele de injectat respectiv simulări realizate pe modele de piese.

Pentru a atinge aceste obiective modul de lucru a fost în implementarea unor tipuri de rețele specifice microinjectării la diametre sub cele convenționale cunoscute la care să se calculeze lungimea maximă a rețelei în funcție de vâscozitatea materialului. Pentru a realiza acest fapt a fost utilizată o progresie aritmetică cu o rație diferită privind lungimea maximă de rețea pentru materiale cu vâscozitate diferită (vs. ridicată sau vs. scăzută) pentru diametre ale rețelei cuprinse între 3mm-0,1mm.

În urma simulării curgerii materialului prin rețele și a rezultatelor obținute au fost realizate simulări de curgere pentru câteva modele referențiale proiectate în capitolul anterior. Acest lucru a fost realizat cu materiale cu vâscozitate diferită existente în baza de date a programului Moldflow. De asemenea au fost realizate o serie de simulări de curgere pentru matrițe cu mai multe cavități/cuiburi.

Capitolul VII al prezentei teze de doctorat prezintă așa cum este evident și din titlu "**Particularități în fabricația unei matrițe experimentale**" modul de realizare, problemele întâlnite și soluțiile găsite în uzinarea diverselor tipuri de pastile amovibile din diverse materiale. De asemenea este prezentat modul de realizare al unei matrițe din material polimeric de tip machetă, care să reprezinte suportul sau punctul de plecare în realizarea celei din oțel.

În finalul lucrării sunt evidențiate **Concluziile și contribuții personale** în urma studiului realizat în domeniul microinjectării și sunt precizate direcțiile viitoare de cercetare în urma rezultatelor obținute.



# Cap. I – Noțiuni fundamentale de reologie și proprietăți de curgere a materialelor polimerice.

## 1.1. Considerații privind reologia materialelor polimerice

Reologia este știința care se ocupă cu studiul curgerii corpurilor sub acțiunea unor forțe și cu răspunsul acestora ca urmare a aplicării forțelor respective.[Rosato, 1999] Reologia este disciplina inclusă în domeniul mecanicii fluidelor care studiază curgerea cu ajutorul diverselor relații matematice. Un obiectiv de mare importanță al reologiei este acela de a obține ecuații constitutive prin care efortul/alungirea să poată fi calculat/ă cu ajutorul vitezei de forfecare a fluidului.[Perry, 1997]

Reologia materialelor plastice, în special a celor termoplastice, este un proces complex. [Rosato, 1999], [Rosato, 2001] Particularizând, reologia polimerilor reprezintă studiul curgerii topiturii de polimer prin rețele sau cavități sub acțiunea unor forțe, fie exterioare fie de natură internă precum și rezultatele obținute în urma studiului realizat.

Topitura de material rezultă de obicei, dintr-o creștere a temperaturii materialului mai sus de temperatura de tranziție vitrosă și de temperatura de topire și este reflectată în fluiditatea materialului ca urmare a mobilității moleculelor sau lanțurilor moleculare ale acestuia.[Gnanou 2008]

Indiferent dacă polimerul este în soluție, în topitură sau în stare solidă cel care realizează experimentul poate obține informațiile corespunzătoare cu privire la toate mișcările suferite de acesta pornind de la mișcarea unei simple molecule până la mișcarea de ansamblu a lanțului molecular prin utilizarea unei tehnici analitice adecvate/corespunzătoare. [Gnanou 2008]

Așa cum se prezintă în cazul celorlalte lichide, vâscozitatea topiturii de polimer este funcție de natura forțelor intermoleculare prezente astfel încât vâscozitatea crește odată cu polaritatea numărului de unități care se repetă și cu prezența legăturilor de hidrogen. Cu toate acestea, există două fenomene specifice care apar numai în cazul topiturilor de polimer:

- ◆ în timpul curgerii lanțurile moleculare alunecă și se freacă unul de celălalt. Atunci când există lanțuri moleculare ce prezintă ramificații sau când sunt realizați substituenții voluminoși, mișcarea relativă a acestora este și mai dificilă fapt care se reflectă printr-o vâscozitate mai mare;

- ◆ masa molară a lanțurilor moleculare reprezintă un factor decisiv ce afectează vâscozitatea acestora.[Gnanou 2008]

Reologia materialelor polimerice nu reprezintă un subiect ușor de abordat, iar experimentele au arătat că se pot obține rezultate relevante în acest domeniu prin aplicarea de modele matematice, dar în compoziția materialului sau în starea de agregare a acestuia se pot produce schimbări semnificative în doar câteva minute care pot schimba radical proprietățile reologice.[Holmberg, 2002]

Comportarea reologică a materialelor este diversă ceea ce face ca studiul curgerii polimerilor să fie deosebit față de cel al metalelor. Necesitatea cunoașterii comportării reologice a polimerilor a apărut în urma descoperirilor recente de înlocuire parțială sau totală a diverselor produse din materiale metalice cu

materialele plastice. De aceea, comportamentul reologic al polimerilor este studiat din două considerente principale:

- proprietățile și comportamentul specific al produselor din materiale polimerice în raport cu cele din materiale metalice;
- proprietățile și comportamentul specific în procesarea și prelucrarea materialelor polimerice.[Șereș, 1996]

În primul caz este vorba de acele proprietăți care diferențiază materialele polimerice de cele metalice. Astfel, dacă materialele metalice sunt guvernate de legea lui Hooke [Harper, 2000] în cazul polimerilor această lege se modifică.

Cele mai simple corpuri studiate de reologie sunt corpurile care posedă o singură proprietate, numite corpuri cu *comportare ideală*, corpuri cu proprietăți unitare sau corpuri reologice *particulare*:

- Solidul lui Hooke, perfect elastic;
- Fluidul lui Newton, pur vâscos;
- Plasticul lui St. Venant, perfect plastic.

Corpul perfect elastic sau solidul lui Hooke, răspunde la o forță exterioară aplicată brusc printr-o deformare elastică, revine la forma inițială după îndepărtarea forței care a produs-o, corpul posedând numai elasticitate. Ecuația reologică sau *legea lui Hooke* reprezintă relația între efortul unitar și deformare.

$$\sigma = E \cdot \delta$$

Comportarea corpului elastic supus la forfecare simplă este descris de relația:

$$\tau = G\gamma, \tag{1.1}$$

în care  $\tau$  este efortul unitar de forfecare,  $\gamma$  este lunecarea specifică iar  $G$  este modulul de lunecare sau modulul de elasticitate transversal. Reograma solidului lui Hooke solicitat la forfecare simplă este reprezentată de o dreaptă a cărei pantă este o măsură a modulului de elasticitate redată în *Figura 1.1,a*.

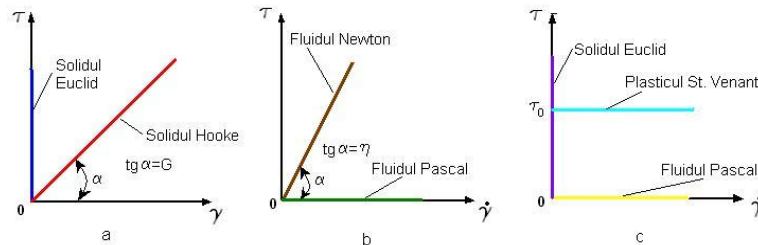


Fig. 1.1. Tipuri de reograme[Kaiser, 2006][Șereș, 1996]

Corpul perfect vâscos sau fluidul lui Newton, opune o rezistență la deformare datorită vâscozității. Corpul posedă în acest caz numai vâscozitate. Ecuația reologică reprezintă o dependență între efortul unitar de forfecare  $\tau$  și viteza de forfecare sau reopanta  $\dot{\gamma}$  .[Șereș, 1996]

Ecuația care descrie comportarea unui asemenea corp este cunoscută sub numele de ecuația lui Newton și are forma următoare

$$\tau = \eta \dot{\gamma}, \tag{1.2}$$

în care  $\eta$  reprezintă coeficientul vâscozității de forfecare. Reograma fluidului newtonian se prezintă în *Figura1.1,b*.

Corpul perfect plastic sau plasticul St. Venant posedă numai plasticitate, fiind necesar un efort limită  $\tau_0$  pentru deformare, care este nelimitată și ireversibilă, viteza de forfecare putând lua valori între 0 și infinit. Ecuația reologică specifică plasticului St. Venant este

$$\tau = \tau_0 \quad (1.3)$$

iar reograma se prezintă ca în *Figura 1.1,c*.

Alte proprietăți specifice ale polimerilor în raport cu materialele metalice sunt vâscozitatea, plasticitatea, alungirea, elasticitatea etc.

În cazul procesării și prelucrării materialelor polimerice în raport cu cele metalice diferențele sunt evidențiate în cazul comparației turnare/injectare. Astfel la obținerea oțelurilor se cunosc procedeele de tragere, trefilare, laminare, calandrare și turnare în forme. În cazul procesării materialelor polimerice amintim extrudarea, calandrarea, termoformarea, formarea prin centrifugare și injectarea. [Iclânzan, 2006] Particularitatea între turnarea metalelor respectiv injectarea materialelor termoplastice este evidentă. Astfel la turnarea materialelor metalice în forme aceasta poate fi realizată manual sau automat, metalul topit fiind turnat din oala de turnare în matriță. Turnarea nu se realizează sub presiune mare, iar piesele sunt lăsate un timp îndelungat în scopul răcirii după care se îndepărtează rețeaua respectiv rețelele de turnare.

La injectarea materialelor polimerice procesul este mai rapid și mai eficient din punct de vedere al productivității. Amintim astfel că fiecare material polimeric are un punct de topire propriu și o temperatură de injectare specifică. De asemenea temperatura de injectare, viteza de injectare, presiunea de menținere, forța de închidere a mașinii și vâscozitatea materialului sunt câteva dintre caracteristicile principale specifice injectării. Totodată o serie de factori importanți în obținerea pieselor dorite îl reprezintă temperatura matriței, contracția materialului și amplasarea punctului de injectare (cu alegerea numărului de puncte de injectare acolo unde este necesar). [Șereș, 1996]

Din punctul de vedere al prelucrării materialelor plastice, acestea pot fi prelucrate prin procedeele cunoscute de strunjire sau frezare dar regimurile de așchiere sunt total diferite față de prelucrarea materialelor metalice.

În acest sens s-au efectuat experimente pe diverse materiale polimerice privind prelucrarea lor prin îndepărtare de material și s-a constatat că cele mai bune rezultate în acest sens au fost obținute la prelucrarea poliamidelor.

Prin urmare în diverse domenii industriale aceste tipuri de materiale polimerice sunt utilizate înlocuind cu succes materialele metalice cum ar fi diverse piese de fricțiune adică roți dințate de diverse dimensiuni, bușe, șuruburi și mai nou chiar rulmenți realizați din aceste materiale.

Dezavantajul materialelor polimerice la prelucrarea prin operații de frezare sau strunjire este acela că acestea au tendința frecventă de a se lipi pe suprafața sculei așchietoare. Acesta reprezintă un lucru îngrijorător deoarece acest fapt duce la o prelucrare defectuoasă a pieselor și în final la cedarea sculei utilizate. Este necesar ca inginerii să respecte datele și îndrumările din cataloagele producătorilor de scule așchietoare pentru evitarea diverselor neplăceri privind realizarea producției sau erorile apărute la prelucrare datorită apariției arsurilor pe piese datorate unor regimuri alese necorespunzător.

De asemenea procedee ca imprimarea, xerografierea sau sudarea/lipirea cu ultrasunete sunt prelucrări specifice materialelor polimerice.

## 1.2. Caracteristici ale fenomenului reologic.

Corpurile reale posedă proprietăți multiple asociate cum ar fi vâscozitate, elasticitate, plasticitate în diverse proporții. Astfel corpurile pot fi vâscoplastice, vâscoelastice, elastoplastice iar unele dintre ele vâscoelastoplastice. Din categoria corpurilor elastoplastice fac parte metalele. Aceste corpuri supuse la solicitări simple, până la o anumită limită se vor deforma elastic.

Materialele polimerice prezintă proprietăți vâscoplastice și vâscoelastice.

Dacă asupra unui corp se aplică o forță aceasta determină deformarea și deplasarea acestuia. Un corp se numește *deformat* atunci când sub acțiunea solicitărilor sau forțelor își modifică forma sau volumul. Deformarea unui solid are loc până la atingerea echilibrului între forțele externe. Deformația este recuperabilă proprietatea numindu-se *elasticitate*. [Rosato, 1997]

În cazul lichidelor deformația a cărei valoare crește continuu și nu se mai recuperează după înlăturarea forței se numește *curgere*. Fluidele opun rezistențe mici la deformare, în timpul curgerii luând naștere forțe de frecare internă care diminuează viteza de deformare. Proprietatea fluidelor de a opune rezistență la schimbarea ireversibilă a poziției elementelor de volum constituente și de a disipa energia mecanică sub formă de căldură se numește *vâscozitate*. [Obergh, 2008][Rosato, 1997] În procesul de injectare materialul polimeric se găsește într-o stare termoplastică și curgerea acestuia se realizează într-o manieră vâscoasă.[Michaeli, 2001] Vâscozitatea unei soluții de polimer depinde atât de masa moleculară a polimerului utilizat, punctul de topire cât și de concentrația de polimer din soluție.[ Wintermantel, 2009][ Mildenberg, 1997]

În cazul unui fluid în mișcare și al unui perete fix există o coeziune și interacțiune între macromoleculele materialului ce au ca rezultat o forță de forfecare între straturile adiacente fapt care conduce la frecare și pierdere de energie.

În fluide există, de asemenea coeziune și interacțiunea dintre moleculele care au ca rezultat o forță de forfecare între straturile adiacente care se deplasează la viteze diferite și între un fluid în mișcare și un perete staționar. Aceasta teorie se aplică la curgerile de tip laminar sau vâscos în strânsă legătură cu o vâscozitate ridicată și cu viteza redusă acolo unde numărul lui Reynold's are valoare mică.

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.4)$$

unde,

$\eta$ [Pa·s] sau kg/(m·s) = vâscozitatea; [Perry, 1997], [Rosato, 2000]

$\tau$ [N/mm<sup>2</sup>] = efortul unitar la forfecare;

$\gamma$ [1/s] = lunecarea specifică.

Vâscozitatea se definește în curgerea laminară ca fiind efortul unitar la forfecare dintre straturile adiacente paralele cu direcția de curgere proporțional cu gradientul vitezei. Vâscozitatea poate fi scăzută sau ridicată conform ANEXEI 1.1.

Dacă considerăm:

$$\tau = \text{constant} \frac{dV}{d\gamma} = \mu \frac{dV}{d\gamma} \quad (1.5)$$

unde  $\tau$  = efortul unitar la forfecare, V=viteza,  $\gamma$  = distanța normală de curgere,  $\mu$  = vâscozitatea dinamică [Carvill, 1993]

Vâscozitatea cinematică se definește astfel:

$$\text{vâscozitatea cinematică} = \frac{\text{vâscozitatea dinamică}}{\text{densitate}} \Leftrightarrow \nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ iar unitatea de}$$

măsură pentru aceasta =  $\frac{m^2}{s}$ .

De asemenea vâscozitatea dinamică se definește prin relația:

$$\mu = \frac{\tau}{(du/dy)} = \frac{\text{efort}}{\text{deformație}} \text{ iar unitatea de măsură în acest caz este}$$

$$= \frac{\text{forța} \times \text{timp}}{(\text{lungimea})^2} = \frac{\text{Newton} \cdot \text{secundă}}{(\text{metru})^2}$$

De asemenea în cazul soluțiilor de polimer din punct de vedere chimic există o relație între vâscozitate și masa moleculară a materialului numit vâscozitate intrinsecă [Sperling, 2006] fiind dată de relația:

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 c} \quad (1.6)$$

unde  $\eta_0$  este considerată vâscozitatea solventului exprimată în Stokes sau Pascal x secundă,  $\eta$  reprezintă vâscozitatea soluției de polimer iar  $c$  este concentrația de soluție. Concentrația de soluție  $c$  se exprimă în grame de soluție pe mililitru de soluție sau, mai frecvent, în grame de soluție la 100 ml de soluție, limita indicelui de vâscozitate fiind dat în reciprocitatea acestor unități, adică, în mililitri per gram.

Cantitatea  $[\eta]$  pentru o soluție de polimer reprezintă măsurarea capacității unei molecule de polimer de a spori vâscozitatea, care depinde forma și de mărimea moleculei polimerului. [Brandrup, 1998]

Măsurători ale vâscozității intrinseci sunt efectuate în soluții diluate iar rezultatul vâscozității depinde de masa moleculară medie. Dacă se consideră că o astfel de soluție diluată curge printr-un tub capilar rata de curgere și viteza de forfecare, este diferită în funcție de distanța până la marginea capilarității. Molecula de polimer deși mică, este de dimensiuni finite și prezintă o rată de forfecare diferită în diversele părți ale învelișului. Această schimbare de viteză rezultă în creșterea forțelor de frecare și a celor rotaționale ale moleculei, ceea ce are ca efect o creștere a vâscozității polimerului în soluție. [Sperling, 2006]

De asemenea vâscozitatea intrinsecă [Kosha, 1993] mai poate fi definită prin formula:

$$\left[ \frac{\eta_{sp}}{c} \right]_{c=0} = [\eta] \quad (1.7)$$

Factorul  $\eta_{sp}$  reprezintă vâscozitatea specifică și are o valoare cuprinsă între 0.2 și 0.6 fiind dată de relația:

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 \quad (1.8)$$

$\eta_{rel}$  reprezintă vâscozitatea relativă și este raportul între vâscozitatea soluției de polimer și vâscozitatea solventului. Vâscozitatea relativă [Holmberg, 2002] se definește prin relația următoare:

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} \quad (1.9)$$

Comportamentul mecanic al materialelor termoplastice este influențat de fenomene vâscoelastice cum sunt: rezistența la tracțiune, duritatea, alungirea la rupere și rezistența la șoc care reprezintă factori de luat în seamă în concepția unui produs. Caracteristicile vâscoase ale topiturii de material sunt, de asemenea, considerente importante în fabricarea de produse din material plastic prin procedeul de injectare și nu numai.[Rosato, 2001]

Teoretic, se consideră că fluidele ideale nu au vâscozitate sau vâscozitatea este zero, dar în practică nu există un fluid ideal. Cu toate acestea fluidele care posedă o vâscozitate foarte mică pot fi considerate ca fluide cu comportare ideală.

Studiul vâscoelasticității polimerilor tratează interdependențele între elasticitate, curgere și mișcarea moleculară. Datorită naturii lanțurilor moleculare lungi ale materialelor polimerice și caracteristicilor lor vâscoelastice, acestea prezintă un interes deosebit pentru cercetători. Acest lucru este valabil în special atunci când timpul alocat pentru relaxarea moleculelor prezintă același ordin și mărime ca și solicitarea mecanică impusă.[Sperling, 2006]

Vâscozitatea topiturii unui polimer la o temperatură dată este măsurată de viteza cu care lanțurile moleculare se pot deplasa relativ unul față de celălalt. Acest lucru va fi controlat prin ușurința de rotație în jurul coloanei principale a legăturii, flexibilitatea lanțului molecular și gradul de împachetare.[Brydson,1999]

Datorită unei flexibilități scăzute a lanțului molecular polimerii cum sunt poliamidele aromatice, policarbonații aromatici și PVC-ul prezintă o vâscozitate ridicată în topitură în comparație cu polietilena și polistirenul. Pentru un anumit polimer vâscozitatea topiturii depinde în mare măsură de masa moleculară a acestuia. Cu cât masa moleculară este mai mare se observă o creștere a vâscozității topiturii de polimer. Cauciucul natural și anumite materiale polimerice care au mase moleculare de ordinul  $10^6$ , nu pot fi prelucrate prin topire până ce lanțurile moleculare nu au fost rupte în unități mai mici în procesele de amestecare. În cazul polietilenei și siliconului cu cât ramificația este mai mare la o greutate constantă și o masă moleculară medie se constată o scădere a vâscozității topiturii.[Brydson,1999]

*Elasticitatea* este o proprietate specifică corpurilor solide, iar vâscozitatea este o proprietate a corpurilor fluide. Multe topituri de polimeri curg sub acțiunea unei solicitări, întrucât posedă vâscozitate, iar după îndepărtarea solicitării o mică parte din deformație se recuperează întrucât posedă și atributul unui solid cu comportare elastică.

Corpurile reale supuse solicitărilor înmagazinează o parte din energie, iar o altă parte o disipează. După descărcare deformația este parțial recuperată. Toate corpurile la care componenta elastică și vâscoasă se manifestă simultan se numesc *vâscoelastice* [Rosato,1998] sau *elastovâscoase*. Toate corpurile vâscoelastice manifestă comportări care depind în mare măsură de timp.[Harper, 2004] Răspunsul unui astfel de material depinde de proprietățile sale, de durata în timp a solicitării, precum și de tipul solicitării. Modificarea scării de timp a experienței poate face ca un material să manifeste două comportări complet diferite. Corpurile vâscoelastice pot fi solide sau fluide. *Solidele vâscoelastice* sunt acele corpuri care sub acțiunea solicitărilor se manifestă ca un solid. Comportarea vâscoelastică a

solidelor se pune în evidență prin experimentele realizate în cazul comportării la fluaj și relaxare.

Din categoria fluidelor vâscoelastice mai fac parte și acele corpuri care sub acțiunea solicitărilor se manifestă preponderent ca un fluid. Comportarea vâscoelastică prezintă soluțiile și topiturile de polimeri. Vâscoelasticitatea este o proprietate tipică materialelor polimerice și poate fi caracterizată prin trei tipuri de experimente asupra materialului: fluaj, relaxare și analize specifice dinamicii fluidelor.[Gnanou 2008] Cercetarea comportării vâscoelastice a fluidelor se face cu ajutorul experiențelor de relaxare sau detensionare. La materialele plastice există două tipuri de deformare sau de curgere una vâscoasă în care energia care provoacă deformarea este disipată și una elastică în care energia se stochează. Prin urmare nu numai că există două clase de deformare diferite dar există două moduri distincte în care deformarea poate fi produsă: prin forfecare simplă sau prin tensiune/solicitare simplă.[Rosato, 2001]

Dacă un corp este supus la o solicitare continuu crescătoare acesta poate să manifeste simultan proprietăți de elasticitate și vâscozitate caz în care corpul este considerat *plastic*. Sub acțiunea unei forțe corpul plastic va curge ca un fluid dacă forța depășește o anumită valoare critică. Materialele plastice sau fluide cu prag de tensiune se mai numesc și *materiale vâscoplastice*.

Curgerea acestor corpuri nu începe decât atunci când tensiunea tangențială atinge o anumită valoare  $\tau_0$  numită prag de tensiune. În domeniul tensiunilor dacă  $\tau < \tau_0$  materialul se comportă ca un solid, iar pentru  $\tau \geq \tau_0$ , materialul se comportă ca un lichid vâscos.

Comportarea vâscoplastică se explică printr-o structură tridimensională ce este capabilă să împiedice curgerea la valori ale tensiunii tangențiale mai mici decât pragul de tensiune. Comportarea vâscoplastică se întâlnește la unele topituri de polimeri, nămoluri de foraj, ciment, pastă de hârtie etc.

Toate corpurile plastice la solicitări mici sunt elastice sau rigide, corespunzând stării solide iar peste valoarea critică a solicitării apare curgerea vâscoasă specifică stării lichide.

Atunci când un material vâscoelastic este supus unei acțiuni de solicitare constantă, pe o perioadă de timp îndelungat comportamentul poartă denumirea de *fluaj*. [Rosato, 2001]

Sub o anumită forță critică, materialele vâscoelastice pot prezenta vâscoelasticitate liniară care reprezintă forța totală la un moment dat și este proporțională cu tensiunea aplicată.

Diferite materiale vâscoelastice pot avea un comportament la fluaj considerabil diferit la aceeași temperatură. Un anumit material vâscoelastic poate avea un comportament diferit la fluaj în cazul unor temperaturi diferite. Modulul de elasticitate longitudinal este deosebit de util pentru inginerul proiectant, deoarece acesta poate fi înlocuit cu modulul lui Young pentru a prezice rigiditatea pe termen lung a materialului polimeric.

Când topitura de material se mișcă într-o direcție paralelă cu o suprafață fixă, cum ar fi melcul din cilindrul de injectare, rețeaua matriței și cavitatea sau chiar pereții matriței sunt supuși unei forțe de forfecare. Pe măsură ce crește viteza melcului crește și viteza de forfecare, cu potențialele avantaje sau dezavantaje.

Avantajele unei viteze de forfecare crescute sunt o vâscozitate scăzută a topiturii și o curgere a materialului polimeric topit cât mai ușoară. Această acțiune de subțiere prin forfecare este vitală pentru ca topitura de material să se deplaseze.

Un dezavantaj care apare la o viteză de forfecare ridicată este aceea că se poate produce o degajare prea mare de căldură ceea ce duce la probleme în răcirea pieselor injectate, precum și degradarea sau decolorarea acestora. O viteză de forfecare mare poate duce la o suprafață aspră sau poroasă a produsului datorită fisurilor ce apar în topitură sau datorită altor cauze. În cazul materialelor polimerice, la injectare se poate dubla presiunea ceea ce determină o creștere cu 2 până la 15 ori a frontului de curgere al topiturii funcție de polimerul utilizat.

Tensiunea necesară pentru menținerea unui corp vâscoelastic la deformare constantă scade lent în timp, iar corpul manifestă fenomenul de *relaxare*.

O altă proprietate a materialelor polimerice în cazul comportării reologice îl reprezintă *densitatea*. Polietilena realizată prin diferite procedee diferă de cele mai multe ori în gradul de încălzire sau ramificare și poate astfel să cristalizeze sau să se grupeze în diverse situații. Din acest motiv, polietilena produsă printr-un proces la o presiune ridicată prezintă o densitate mai joasă decât polietilena produsă prin utilizarea unor catalizatori folosind oxidul de fier. [Brydson,1999]

Se consideră că o conformație adoptată de o moleculă a unui material în structura cristalină va afecta densitatea. Întrucât polietilena adoptă o conformație de tip zig-zag în plan, datorită unor factori probabili, o moleculă de polipropilenă adoptă o conformație elicoidală în zona cristalină. Aceasta necesită un spațiu ceva mai mare iar polipropilena izotactică are o densitate mai mică decât polietilena. Pe lângă densitatea materialului ca și caracteristică reologică se poate aminti rezistența acestuia la diversele solicitări din timpul procesului. Anumite materiale plastice în condiții diverse sau normale de utilizare sunt considerate fie materiale fragile fie tenace. Astfel, polistirenul precum și PVC-ul neplastifiat sunt evaluate în mod normal ca fiind fragile în timp ce polietilena de joasă densitate și PVC-ul plastifiat sunt considerate a fi materiale cu duritate ridicată. [Brydson, 1999]

O altă proprietate pe care trebuie să o avem în vedere în cazul procesării materialelor polimerice este limita de curgere a topiturii de polimer. Atunci când un fluid real curge la granița cu un solid particulele de fluid/lichid aderă la peretele solidului respectiv și apare astfel o stare fără alunecare. Acest fapt înseamnă că viteza de curgere a lichidului la frontieră va fi aceeași cu viteza limită iar dacă limita este staționară viteza fluidului la limită/perete va fi egală cu zero. Acest lucru este reprezentat în figura 1.2 unde viteza limită la perete este  $V_{min}$ .

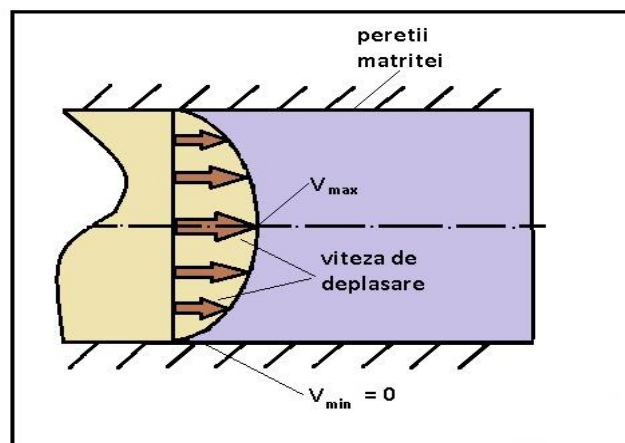


Fig. 1.2. Viteza de curgere a topiturii în matrită [adaptat după Sawhey, 2007]



Cu cât ne îndepărtăm de peretele matriței vom constata că viteza de curgere a topiturii de polimer va fi mai mare. Datorită variației de viteză de la peretele matriței la centrul pesei se constată apariția unui gradient de viteză. Viteza topiturii materialului crește de la zero la perete până la o viteză limită maximă în direcția normală de curgere la centrul piesei sau a rețelei de injectat. [Sawhey, 2007]

### 1.3. Fluide Newtoniene. Fluide nonnewtoniene.

Fluidele pot să prezinte diverse moduri de existență cum ar fi apa, materialul plastic topit, aerul, aburul, benzina, uleiul etc. În practică se cunosc diverse stări ale acestora ele fiind împărțite astfel: fluide statice, fluide ideale, fluide compresibile, fluide incompresibile, fluide newtoniene, fluide non-newtoniene, fluide hidrostatice respectiv fluide magnetice. [Chang, 2007]

Desigur că toate aceste tipuri de fluide au un domeniu reologic dezvoltat mai mult sau mai puțin în funcție de doleanțele industriilor și domeniul de aplicare.

Astfel s-au dezvoltat o serie de software-uri diverse pentru simulări ale deplasării curenților de aer, a curenților din interiorul unor tornade sau uragane, ale curgerii diverselor materiale lichide cum ar fi curgerea apei prin tuburi, curgerea lichidelor cu diferite vâscozități, curgerea lavei dintr-un vulcan, curgerea materialelor metalice topite, curgerea topiturii de polimer, curgerea turbulentă a aburului în diverse medii, curgerea cimentului dintr-o betonieră, curgerea dintr-un recipient în alt recipient, curgerea prin secțiuni înguste, deplasarea curenților electric și a câmpurilor magnetice, curgerea sângelui, curgerea mercurului etc.

Pentru majoritatea acestor tipologii de curgere softurile utilizează o serie de formule matematice care țin seama de parametrii ca vâscozitatea materialului, timpul de curgere, presiunea aplicată la curgere, tipul secțiunii de curgere și nu numai. Aceste ecuații utilizate de programe sunt denumite modele matematice și o serie din acestea sunt specifice pentru fiecare tip de curgere sau aplicație.

Domeniul de interes al prezentei teze de doctorat este acela de a studia comportarea la curgere a fluidelor non-newtoniene motiv pentru care principalele fluide alese dintre cele amintite anterior, pentru o prezentare succintă sau pentru punerea acestora în evidență vor fi fluidele ideale, newtoniene și cele non-newtoniene.

În figura 1.3 se prezintă o clasificare simplistă a fluidelor în newtoniene și non-newtoniene cu relațiile caracteristice acestora.

Legile fizicii sunt derivate majoritatea din principiile conservării cum sunt ecuația de conservare a masei, ecuația de conservare a momentului respectiv ecuația de conservare a energiei.

Dacă considerăm un fluid (gaz sau lichid) în mișcare, viteza de curgere a acestuia este descrisă de ecuația de mai jos:

$$u(x, y, z, t) = \begin{pmatrix} u_1(x, y, z, t) \\ u_2(x, y, z, t) \\ u_3(x, y, z, t) \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

și determinată de densitatea fluidului  $\rho = \rho(x, y, z, t)$  în punctul  $x = (x, y, z)$  la timpul  $t^2$ .

Dacă fluidul ajunge la un timp particular  $t$  o porțiune arbitrară a volumului  $W(t)$  cu suprafața  $\partial W(t)$  vom constata că particulele fluidului se vor mișca după

legea  $W(t+h)$  pentru a obține volumul  $t+h$  format în acelaș mod în care particulele au format  $W(t)$  la timpul  $t$ . Mai mult, dacă vom considera  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  o funcție descrisă ca fiind o stare particulară a fluidului la timpul  $t$  în punctul  $x$  considerat masa per unitatea de volum (densitatea), energia interioară per volum sau momentul per volum atunci integrala  $\int_{W(t)} \varphi d(x, y, z)$  oferă valoarea

maximă a masei sau energiei interioare, momentului etc a volumului  $W(t)$  aflat sub considerentele anterioare.

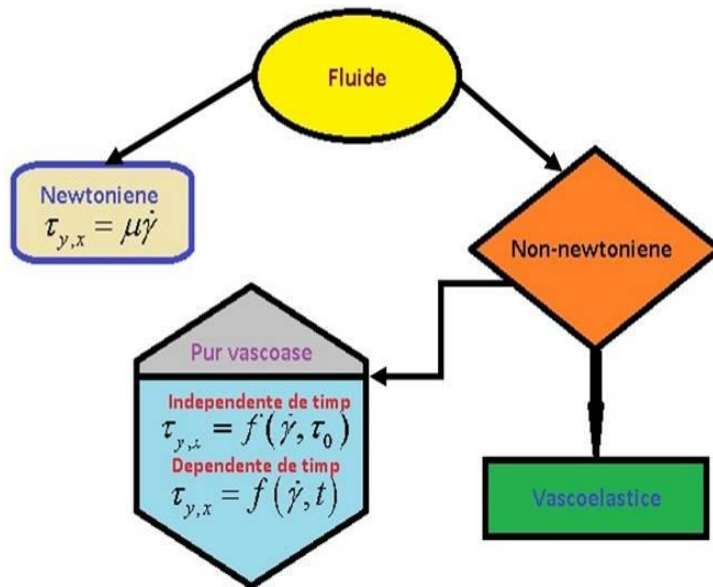


Fig.1.3. Clasificarea fluidelor [adaptat după Kreith, 1999]

În funcție de timp vom modifica integrala inițială în următoarea:

$$\int_{W(t)} \varphi d(x, y, z) \rightarrow \frac{d}{dt} \int_{W(t)} \varphi(x, y, z, t) d(x, y, z). \quad (1.11)$$

se calculează ecuația (1.11) și se obține:

$$\frac{d}{dt} \int_{W(t)} \varphi(x, y, z, t) d(x, y, z) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \left\{ \int_{W(t+h)} \varphi(\tilde{y}, t+h) d(y_1, y_2, y_3) - \int_{W(t)} \varphi(x, y, z, t) d(x, y, z) \right\}; \quad (1.12)$$

unde schimbarea din  $W(t)$  în  $W(t+h)$  este evidențiată de ecuația

$$\tilde{y} = x + h \cdot u(x, t) + o(h) \quad (\tilde{y} = (y_1, y_2, y_3)^T). \quad (1.13)$$

Termenul eroare  $o(h)$  depinde de  $x$  dar menține proprietatea  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} o(h) = 0$ .

Transformarea integralei peste volum  $W(t+h)$  într-o integrală  $W(t)$  prin substituire duce la utilizarea multiplicării integrandului cu determinantul acestei aplicații.

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} (1+h\partial_x u_1) & h\partial_y u_1 & h\partial_z u_1 \\ h\partial_x u_2 & (1+h\partial_y u_2) & h\partial_z u_2 \\ h\partial_x u_3 & h\partial_y u_3 & (1+h\partial_z u_3) \end{vmatrix} + o(h) \\ &= 1 + h \cdot (\partial_x u_1 + \partial_y u_2 + \partial_z u_3) + o(h) \\ &= 1 + h \cdot \operatorname{div} u(x, t) + o(h). \end{aligned} \quad (1.14)$$

Din expansiunea lui Taylor a componentei  $\varphi(\tilde{y}, t+h)$  în jurul lui  $(x, t)$  rezultă relația:

$$\frac{d}{dt} \int_{W(t)} \varphi(x, y, z, t) d(x, y, z) = \int_{W(t)} \{ \partial_t \varphi + \varphi \operatorname{div} u + \langle u, \nabla \varphi \rangle \} d(x, y, z). \quad (1.15)$$

Notăția  $\nabla \varphi$  reprezintă gradientul unei funcții scalare  $\varphi$  iar  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  reprezintă produsul scalar a doi vectori în afara lui  $\mathbf{R}^3$ .

Produsul derivatelor dă următoarele:

$$\varphi \operatorname{div} u + \langle u, \nabla \varphi \rangle = \operatorname{div}(\varphi \cdot u),$$

astfel încât relația (1.15) conduce la Teorema de transport a lui Reynolds'

$$\frac{d}{dt} \int_{W(t)} \varphi(x, y, z, t) d(x, y, z) = \int_{W(t)} \{ \partial_t \varphi + \operatorname{div}(\varphi \cdot u) \} d(x, y, z). \quad (1.16)$$

Așa cum s-a menționat anterior dinamica fluidelor poate fi descrisă direct cu ajutorul ecuațiilor de conservare precum și cu o ecuație de stare.

a) *Legea conservării masei:* în cazul în care nu există pierderi de fluid în cazul curgerii considerate se constată că masa rămâne constantă.

Deoarece  $W(t)$  și  $W(t+h)$  prezintă aceleași particule ele au aceeași masă. Masa lui  $W(t)$  este dată de ecuația  $\int_{W(t)} \rho(x, y, z, t) d(x, y, z)$  iar ecuația anterioară

devine  $\frac{d}{dt} \int_{W(t)} \rho(x, y, z, t) d(x, y, z) = 0$ . În relația (1.16) se face modificarea

( $\varphi = \rho$ ) de unde rezultă:

$$\int_{W(t)} \{ \partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho u) \} d(x, y, z) = 0. \quad (1.17)$$

Integrala dispare deoarece ecuația a fost prelucrată pentru un  $W(t)$  arbitrar iar ecuația rezultantă reprezintă ecuația de continuitate.

$$\boxed{\partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho u) = 0} \quad (1.18)$$

b) *Legea de conservare a momentului:* Un alt principiu de conservare îl reprezintă momentul unei mase care se definește ca fiind produsul dintre masă și viteză.

Astfel relația:

$$\int_{W(t)} \rho u d(x, y, z) \quad (1.19)$$

dă momentul masei la un timp  $t$  a volumului  $W(t)$  și ecuația următoare descrie **densitatea momentului.**

$$q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \rho u \quad (1.20)$$

Principiul conservării momentului, în care forța reprezintă masa x accelerația (Legea a II a a lui Newton) se referă la schimbarea momentului la intervale de timp egale cu suma tuturor forțelor exterioare ce acționează asupra masei lui  $W(t)$ .

Pentru a descrie aceste forțe exterioare trebuie să admitem faptul că există o anumită presiune  $p(x, t)$  în fiecare punct  $x$  al fluidului la fiecare interval de timp  $t$ . Dacă  $n$  se consideră o unitate vectorială normală la suprafața  $\partial W(t)$  a lui  $W(t)$  și în direcție exterioară, exteriorul fluidului lui  $W(t)$  tinde la o forță dată de relația:

$$- \int_{\partial W(t)} p n d\sigma \left( d\sigma = \text{aria elementului lui } \partial W(t) \right). \quad (1.21)$$

În afara unor forțe normale la suprafața generată de presiune există forțe tangențiale care acționează la suprafața fluidului la contactul cu particulele exterioare. Această proprietate reprezintă vâscozitatea fluidului fiind un fenomen remarcabil. Pe lângă forțele exterioare per unitatea suprafeței se găsesc și forțe exterioare per unitatea de volum mai exact greutatea.

Dacă aceste forțe per unitatea de volum sunt notate cu  $k$  legea a II a a lui Newton devine:

$$\frac{d}{dt} \int_{W(t)} q d(x, y, z) = \int_{W(t)} k(x, y, z, t) d(x, y, z) - \int_{\partial W(t)} p \cdot n d\sigma. \quad (1.22)$$

Astfel din teorema de divergență a lui Gauss vom avea:

$$\int_{\partial W(t)} p n_i d\sigma = \int_{\partial W(t)} p n_1 d\sigma = \int_{\partial W(t)} p n_2 d\sigma = \int_{\partial W(t)} p n_3 d\sigma = \int_{W(t)} \partial_x p d(x, y, z) = \int_{W(t)} \partial_y p d(x, y, z) = \int_{W(t)} \partial_z p d(x, y, z) = \int_{W(t)} \nabla p d(x, y, z). \quad (1.23)$$

Împreună cu relația (1.16) v-a rezulta ecuația:

$$\int_{W(t)} \left\{ \partial_t q + \begin{pmatrix} \text{div}(q_1 u) \\ \text{div}(q_2 u) \\ \text{div}(q_3 u) \end{pmatrix} - k + \nabla p \right\} d(x, y, z) = 0 \quad (1.24)$$

Acest fapt trebuie să fie valid pentru orice volum ales arbitrar  $W(t)$ . Dacă

$$\text{div}(q_i u) = \langle u, \nabla q_i \rangle + \text{div} u \cdot q_i$$

$$\partial_t q + \langle u, \nabla \rangle q + \text{div} u \cdot q + \nabla p = k,$$

$$\partial_t q + \frac{1}{\rho} \langle q, \nabla \rangle q + \text{div} \left( \frac{1}{\rho} q \right) \cdot q + \nabla p = k \quad (1.25)$$

Ecuația reprezentată de (1.25) fără componentele  $q$  și  $u$  este reformulată astfel:

$$\partial_t u + \langle u, \nabla \rangle u + \frac{1}{\rho} \nabla p = \hat{k}, \quad (1.26)$$

unde  $k$  reprezintă forța pe unitatea de volum ce a fost înlocuită de forța  $\hat{k} = \frac{1}{\rho} k$  pe unitatea de masă. Ecuația (1.18) împreună cu (1.25) și (1.26) sunt

denumite **Ecuațiile lui Euler**.

În aceste relații variabilele  $\rho, E, q_1, q_2, q_3$  sunt denumite variabile conservative iar  $\rho, \varepsilon, u_1, u_2, u_3$  sunt variabile primitive. Prin urmare:

$$E := \rho \varepsilon + \frac{\rho}{2} \|u\|^2 = \rho \varepsilon + \frac{\|q\|^2}{2\rho} \quad (1.27)$$

Relația dă energia totală per unitatea de volum unde  $\varepsilon$  reprezintă energia interioară pe unitatea de masă, căldura per unitatea de masă.

$\frac{\rho}{2} \|u\|^2$  reprezintă **energia cinetică** per volum iar  $\langle u, \nabla \rangle u$  se numește **termen de convecție**.

c) *Legea conservării energiei sau prima lege a Termodinamicii.*

Modificarea în unitatea de timp a energiei interne totale  $E$  a unui volum de fluid este egală cu lucru mecanic efectuat în timp supra acțiunea unor forțe exterioare. Astfel pentru fluidele ideale vom avea:

$$\frac{d}{dt} \int_{W(t)} E(x, y, z, t) d(x, y, z) = \int_{W(t)} \langle \rho \hat{k}, u \rangle d(x, y, z) - \int_{\partial W(t)} \langle pn, u \rangle do \quad (1.28)$$

Relația

$$\int_{\partial W(t)} \langle pn, u \rangle do = \int_{\partial W(t)} \langle pu, n \rangle do = \int_{W(t)} \text{div}(pu) d(x, y, z) \quad (1.29)$$

urmează prin teorema de divergență a lui Gauss astfel încât relația (1.16) devine:

$$\int_{W(t)} \left\{ \partial_t E + \text{div}(E \cdot u) + \text{div}(p \cdot u) - \langle \rho \hat{k}, u \rangle \right\} d(x, y, z) = 0 \quad \forall W(t). \quad (1.30)$$

Dacă coeficientul  $k$  nu se ia în considerare datorită greutateii mici a gazului sau dacă  $\hat{k}$  reprezintă greutatea fluidului per unitatea de masă și  $u$  viteza de curgere la suprafața pământului vom avea:

$$\boxed{\partial_t E + \text{div} \left( \frac{E+p}{\rho} q \right) = 0} \quad (1.31)$$

Explicitând relațiile (1.18), (1.25) și (1.31) se obține relația (1.32) sub următoarea formă:

$$\begin{aligned} \partial_t \rho + \partial_x q_1 + \partial_y q_2 + \partial_z q_3 &= 0 \\ \partial_t q_1 + \partial_x \left( \frac{1}{\rho} q_1 q_1 + p \right) + \partial_y \left( \frac{1}{\rho} q_1 q_2 \right) + \partial_z \left( \frac{1}{\rho} q_1 q_3 \right) &= 0 \\ \partial_t q_2 + \partial_x \left( \frac{1}{\rho} q_2 q_1 \right) + \partial_y \left( \frac{1}{\rho} q_2 q_2 + p \right) + \partial_z \left( \frac{1}{\rho} q_2 q_3 \right) &= 0 \quad (1.32) \\ \partial_t q_3 + \partial_x \left( \frac{1}{\rho} q_3 q_1 \right) + \partial_y \left( \frac{1}{\rho} q_3 q_2 \right) + \partial_z \left( \frac{1}{\rho} q_3 q_3 + p \right) &= 0 \\ \partial_t E + \partial_x \left( \frac{E+p}{\rho} q_1 \right) + \partial_y \left( \frac{E+p}{\rho} q_2 \right) + \partial_z \left( \frac{E+p}{\rho} q_3 \right) &= 0 \end{aligned}$$

Prin urmare rezultă un sistem de ecuații pentru determinarea funcțiilor  $\rho, q_1, q_2, q_3, E$ . De asemenea mai rămâne să căutăm funcția numită presiunea  $p$ .

În cazul în care densitatea este constantă  $\rho$  iar  $\partial_t \rho = 0 \quad \forall (x, y, z)$  vor rămâne doar patru variabile de determinat astfel că cele cinci ecuații (1.32) sunt suficiente în determinarea variabilelor amintite.

În cazul particular al gazelor se adaugă o a șasea ecuație care poartă denumirea de *ecuația de stare*.

### 1.3.1. Fluidele Newtoniene. Corelații/Formule matematice.

Fluidele newtoniene urmează ecuația lui Newton pentru vâscozitate. Pentru astfel de fluide, vâscozitatea dinamică nu se schimbă cu viteza de deformare. Din categoria fluidelor newtoniene fac parte apa, kerosenul și aerul.[Sawhey, 2007]

Curgerea Newtoniană este o caracteristică de curgere unde un material (lichid, etc) curge imediat sub acțiunea unei forțe și la care viteza de curgere este direct proporțională cu forța aplicată. Caracteristica de curgere evidentă în acest caz este aceea că vâscozitatea este independentă de viteza de forfecare. Apa precum și uleiurile minerale subțiri sunt exemple de fluide care posedă o curgere Newtoniană.

Fluidele Newtoniene pot fi compresibile sau incompresibile, astfel lichide cum sunt apa sau mercurul au ca proprietate că densitatea rămâne neschimbată sub influența presiunii. Idealizând această proprietate vom defini un **fluid incompresibil** ca fiind acela care prezintă aceeași densitate a fiecărei particule în urma unei stări de tensiune. Pentru un fluid incompresibil aceasta se definește:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1.33)$$

și urmează ecuația de conservare a masei:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial v_k}{\partial x_k} = 0 \quad (1.34)$$

apoi

$$\frac{\partial v_k}{\partial x_k} = 0 \quad (1.35a)$$

sau

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (1.35b)$$

Toate fluidele incompresibile nu trebuie să aibă o densitate spațială uniformă. Dacă densitatea este uniformă aceasta se referă la fluidele omogene pentru care densitatea este constantă peste tot. În cazul studiilor teoretice s-a convenit recunoașterea fluidelor compresibile și incompresibile ca fiind două tipuri distincte de fluide.

*Ecuatia hidrostatică*- ecuația de echilibru este:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + \rho B_i = 0 \quad (1.36)$$

unde  $B_i$  reprezintă componeta forței corpului per unitatea de masă.

Dacă

$$T_{ij} = -p\delta_{ij}$$

ecuația (1.36) devine:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \rho B_i \quad (1.37a)$$

sau,

$$\nabla p = \rho B \quad (1.37b)$$

În cazul în care  $B_i$  reprezintă componenta greutateii pe unitatea de masă dacă axa  $x_3$  este lăsată pozitivă și verticală în jos vom avea:

$$B_1 = 0, \quad B_2 = 0, \quad B_3 = g \quad (1.38)$$

astfel încât

$$\frac{\partial p}{\partial x_1} = 0 \quad (1.39a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_2} = 0 \quad (1.39b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = \rho g \quad (1.39c)$$

Ecuțiile (1.39a,b) arată faptul că  $p$  este o funcție a lui  $x_3$  iar ecuația (1.39c) dă diferența de presiune între punctul 2 și punctul 1 din lichid astfel:

$$p_2 - p_1 = \rho gh \quad (1.40)$$

unde  $h$  este înălțimea punctului 2 raportat la punctul 1. Totuși presiunea statică din lichid depinde doar de adâncime. Presiunea se consideră aceeași pentru toate particulele care se găsesc în acelaș plan orizontal cu fluidul. În cazul în care fluidul se află într-o stare de corp rigid (cu viteza de deformare egală cu zero) ecuația ce predomină este dată de:

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho B_i = \rho a_i \quad (1.41)$$

unde  $a_i$  reprezintă accelerația.

Dacă se aplică o tensiune unui solid elastic acesta se va deforma de la condiția inițială și va ajunge la o stare de echilibru, deformația inițială dispărând dacă forța sau tensiunile asupra corpului dispar. În cazul în care se aplică o forță de deformare unui fluid acesta se deformează comparativ cu starea inițială și rămâne în această stare chiar după îndepărtarea forțelor aplicate. În cazul diverselor fluide nu este necesară o menținere a tensiunii pentru a obține un anumit grad de deformare dar o anumită valoare a tensiunii este necesară pentru obținerea unei viteze constante de deformare. [Lai, 1999]

În cazul în care într-un fluid se introduce un corp rigid se obține un tensor isotropic care este de obicei un tensor de stres și care se împarte astfel:

$$T = -pI + T' \quad (1.42a)$$

$$T'_{ij} = -p\delta_{ij} + T'_{ij} \quad (1.42b)$$

unde  $T'$  depinde de viteza de deformare iar  $p$  este un scalar a cărei valoare nu depinde neapărat de viteza de deformare. Materialele ce sunt considerate a fi fluide Newtoniene ideale se împart astfel:

I. Pentru fiecare punct al materialului valoarea lui  $T'_{ij}$  la orice timp  $t$  depinde de viteza tensorului de deformare:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.43)$$

la acel timp și nu la o altă cantitate cinematică cum ar fi viteza ridicată de deformare.

II. Fluidul este izotrop și respectă configurația dată.



Utilizând acelaș argument cu un material izotrop liniar elastic vom obține pentru un fluid Newtonian în care componenta  $T'_{ij}$  împreună cu  $\Delta \equiv D_{11} + D_{22} + D_{33} = D_{kk}$  relația:

$$T'_{ij} = \lambda \Delta \delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad (1.44)$$

unde  $\lambda$  și  $\mu$  sunt constante ce țin de material. Tensorul de stres  $T'_{ij}$  este cunoscut ca fiind *tensorul de stres vâscos*. Totalitatea tensorului de stres este reprezentată astfel:

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda \Delta \delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad (1.45)$$

Relația se împarte astfel:

$$T_{11} = -p + \lambda \Delta + 2\mu D_{11} \quad (1.46a)$$

$$T_{22} = -p + \lambda \Delta + 2\mu D_{22} \quad (1.46b)$$

$$T_{33} = -p + \lambda \Delta + 2\mu D_{33} \quad (1.46c)$$

$$T_{12} = 2\mu D_{12} \quad (1.46d)$$

$$T_{13} = 2\mu D_{13} \quad (1.46e)$$

$$T_{23} = 2\mu D_{23} \quad (1.46f)$$

scalarul  $p$  în ecuațiile anterioare reprezintă **presiunea**. Această terminologie este oarecum ambiguă deoarece așa cum se observă din ecuații dacă  $D_{ij}$  este diferit de zero,  $p$  reprezintă doar o parte a tensiunii compressive la un plan. În cazul unei teorii a fluidelor este necesar să se reamintească faptul că tensorul izotrop  $-p\delta_{ij}$  reprezintă acea parte a lui  $T_{ij}$  care nu depinde în mod deosebit de viteza de deformare.

### 1.3.1.1. Fluidele Newtoniene incompresibile.

Pentru un fluid incompresibil  $\Delta \equiv D_{ij} = 0$  tot timpul. [Lai, 1999] Ecuația constitutivă a fluidului devine:

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad (1.47)$$

Din ecuație se observă faptul că

$$T_{ij} = -3p + 2\mu D_{ij} = -3p$$

de unde

$$p = \frac{-T_{ij}}{3} \quad (1.48)$$

În cazul fluidelor incompresibile presiunea ce acționează asupra unui fluid nu afectează proprietățile mecanice ale acestuia. De asemenea această presiune din fluidele incompresibile este adesea cunoscută sub denumirea de presiune nedeterminată. În cazul în care valoarea presiunii se impune din condițiile prescrise câmpul/valoarea presiunii nu mai trebuie determinat/ă.

Pornind de la ecuația:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.49)$$

unde  $v_i$  este componenta vitezei, ecuația rezultantă are forma:

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.50)$$

iar ecuația devine:

$$T_{11} = -p + 2\mu \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \quad (1.51a)$$

$$T_{22} = -p + 2\mu \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \quad (1.51b)$$

$$T_{33} = -p + 2\mu \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \quad (1.51c)$$

$$T_{12} = \mu \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right) \quad (1.51d)$$

$$T_{13} = \mu \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_3} + \frac{\partial v_3}{\partial x_1} \right) \quad (1.51e)$$

$$T_{23} = \mu \left( \frac{\partial v_2}{\partial x_3} + \frac{\partial v_3}{\partial x_2} \right) \quad (1.51f)$$

*Ecuatiile lui Navier-Stokes pentru fluidele incompresibile [Lai, 1999]*

Din ecuația:

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho B_i + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (1.52)$$

precum și

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j \partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \right)$$

vom obține următoarele ecuații:

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho B_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1.53)$$

Ecuatia rezultantă se scrie astfel:

$$\rho \left( \frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right) = \rho B_1 - \frac{\partial p}{\partial x_1} + \mu \left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) v_1 \quad (1.54a)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_2}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_2}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right) = \rho B_2 - \frac{\partial p}{\partial x_2} + \mu \left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) v_2 \quad (1.54b)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_3}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_3}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_3}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) = \rho B_3 - \frac{\partial p}{\partial x_3} + \mu \left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right) v_3 \quad (1.54c)$$

sau în forma invariantă:

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (\nabla v) v \right] = \rho B - \nabla p + \mu \operatorname{div}(\nabla v) \quad (1.54d)$$

Acestea sunt cunoscute ca fiind **Ecuatiile lui Navier-Stokes** pentru fluidele Newtoniene incompresibile în care există patru funcții necunoscute  $v_1, v_2, v_3$  și respectiv  $p$  în trei ecuații. Cea de-a patra ecuație este suplimentară dacă ecuația de continuitate  $\Delta = 0$ :

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = 0 \quad (1.55a)$$

sau în forma invariantă

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (1.55b)$$

*Ecuatiile Navier-Stokes pentru fluidele incompresibile în coordonate cilindrice și sferice.* [Lai, 1999]

(A) Coordonate Cilindrice

Dacă  $v_r, v_\theta, v_z$  reprezintă componenta vitezei în direcția  $(r, \theta, z)$  ecuațiile lui Navier-Stokes pentru un fluid incompresibil Newtonian sunt:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + B_r + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r}{r^2} \right] \quad (1.56a)$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + B_\theta + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r^2} \right] \quad (1.56b)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial z} + B_z + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] \quad (1.56c)$$

Ecuatia de continuitate ia forma

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1.57)$$

(B) Coordonate Sferice. Dacă  $v_r, v_\theta, v_\phi$  reprezintă componenta vitezei în  $(r, \theta, \phi)$  ecuațiile lui Navier-Stokes pentru un fluid incompresibil Newtonian sunt:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{v_\theta^2 + v_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + B_r +$$

$$\frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_r) \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \phi^2} - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \sin \theta) - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} \right]$$
(1.58a)

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \phi} + \frac{v_\theta v_r}{r} - \frac{v_\phi^2 \cot \theta}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + B_\theta +$$

$$\frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \sin \theta) \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \phi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{2 \cot \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} \right]$$
(1.58b)

$$\frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \theta} + \frac{v_\phi}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{v_\theta v_r}{r} + \frac{v_\phi v_\theta \cot \theta}{r} = -\frac{1}{\rho r \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \phi} + B_\phi +$$

$$\frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial v_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\phi \sin \theta) \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + \frac{2 \cot \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \phi} \right]$$
(1.58c)

Ecuția de continuitate este de forma:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} = 0$$
(1.59)

### 1.3.1.2. Curgerea plană Poiseuille

Acest tip de curgere mai poartă denumirea de „curgerea vâscoasă printr-un tub (Poiseuille)”. [Ryntz, 2003]

Vâscozitatea poate fi determinată prin măsurarea căderii totale de presiune ( $\Delta\phi = \Delta P + \rho g \Delta z$ ) și o rată de curgere (Q) laminară constantă printr-un tub circular cu o lungime L și diametrul D. (aceasta poartă denumirea de curgere Poiseuille). [Albright 2009] Tensiunea de forfecare sau efortul unitar de forfecare la peretele tubului  $\tau_w$  este determinată de căderea de presiune măsurată astfel:

$$\tau_w = -\frac{\Delta\phi}{4L/D}$$
(1.60)

iar viteza de forfecare la peretele tubului este data de:

$$\dot{\gamma}_w = \Gamma \left( \frac{3n'+1}{4n'} \right)$$
(1.61)

unde

$$\Gamma = \frac{32Q}{\pi R} = \frac{8V}{D}$$
(1.62)

iar

$$n' = \frac{d \log \tau_w}{d \log \Gamma} = \frac{d \log(-\Delta\phi)}{d \log Q} \quad (1.63)$$

este panta dată de punctul logaritmice al graficului  $\Delta\phi$  versus  $Q$ , evaluat la fiecare punct de pe grafic.[Albright, 2009]

### 1.3.1.3. Curgerea Hagen-Poiseuille

Pentru un fluid Newtonian în curgerea laminară avem:

$$f = \frac{4\pi D\mu}{Q\rho} = \frac{16\mu}{DV\rho} = \frac{16}{N_{Re}} \quad (1.64)$$

unde un singur grup adimensional, în funcție de numărul lui Reynolds este necesar pentru a caracteriza curgerea laminară și are valoarea 16. Când acesta este introdus în ecuația lui Bernoulli, rezultatul este dat de:

$$Q = \frac{\pi\Delta\phi D^4}{128\mu L} \quad (1.65)$$

care poartă denumirea de **ecuația Hagen-Poiseuille**. [Houghton, 2003]

Numărul lui Reynolds se definește în acest caz ca fiind dat de relația:

$$Re = \frac{D\rho V}{\mu} = \frac{DG}{\mu} = \frac{DV}{\nu} \quad (1.66)$$

unde  $D$  este lungimea caracteristică a sistemului,  $\rho$  este densitatea fluidului care curge,  $V$  este viteza caracteristică a fluidului și  $\mu$  este vâscozitatea absolută a fluidului.  $G (= \rho V)$  este viteza masei de fluid sau masa cantității/fluxului de lichid/fluid iar  $\nu = (\mu / \rho)$  reprezintă vâscozitatea cinematică.

Definițiile exacte ale lui  $D$  și  $V$  depind în mare măsură de geometria sistemului și trebuie definite cu mare atenție în fiecare caz în parte. În cazul celor mai multe calcule proprietățile fizice ale fluidului sunt evaluate la temperatura medie de procesare între cea de intrare și evacuare a acestuia.

Numărul lui Reynolds reprezintă o măsură a ratei de transport a momentului curgerii într-o topitură de material supra pierderea vâscozității la suprafața solidului cu care intră în contact.

Mai simplu, aceasta reprezintă o măsură a intensității turbulențelor dintr-un fluid. Dacă avem o curgere laminară numărul lui Reynolds este mic, iar materialul trece de regulă, printr-o regiune de tranziție înainte de a deveni pe deplin turbulent ceea ce oferă un număr  $Re$  mare.

Valorile  $Re$  care caracterizează aceste regimuri de curgere sunt diferite pentru fiecare secțiune geometrică. De exemplu pentru o curgere într-un tub perfect rotund/cilindric se constată ca  $Re < 2100-2300$  pentru o curgere laminară și  $Re > 7,000-10,000$  pentru o curgere turbulentă. [Albright 2009]

### 1.3.1.4. Ecuația energiei pentru un fluid Newtonian

Pentru definirea ecuației energiei o definire mai simplistă este curgerea radială între două discuri paralele. [Osswald, 2006]

Modelul newtonian de curgere radială între două discuri paralele este modalitatea de curgere cunoscută în prelucrarea polimerilor, în special în timpul umplerii matrițelor de injectat. În acest sens vom considera faptul că profilul vitezei,

vitezele de curgere și presiunile pentru acest tip de curgere sunt în concordanță cu notația prezentată în figura 1.4.

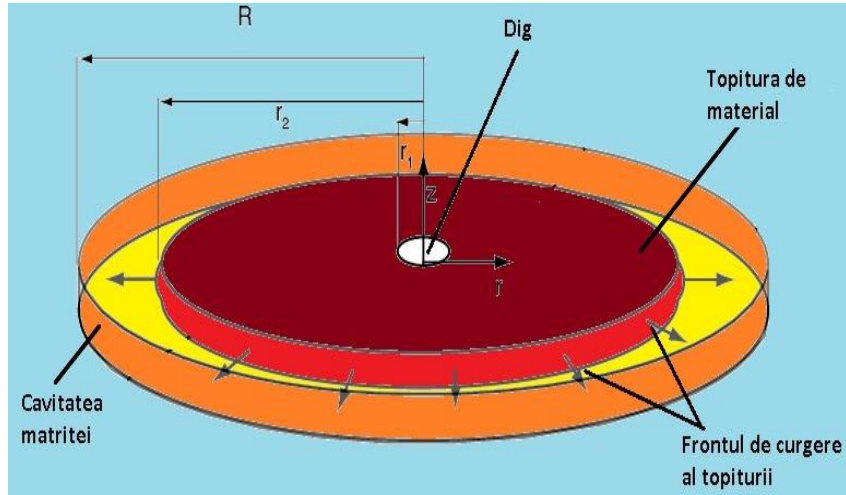


Fig.1.4. Schema de curgere radială între două discuri paralele [Osswald, 2006]

Să considerăm un fluid newtonian a cărui curgere se realizează între două discuri paralele sub influența gradientului de presiune, ce sunt separate de o distanță  $2h$ . Conform modelului de fluid newtonian, componentele solicitărilor sunt:

$$\begin{aligned}\tau_{rr} &= -2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \tau_{\theta\theta} &= -2\mu \frac{u_r}{r} \\ \tau_{rz} &= \tau_{zr} = -\mu \frac{\partial u_r}{\partial z}\end{aligned}\quad (1.67)$$

Ecuția de continuitate se reduce la

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) = 0 \quad (1.68)$$

care indică faptul că  $ru_r$  trebuie să fie o funcție doar de  $z$ ,  $f(z)$ . Din ecuația de continuitate rezultă:

$$u_r = \frac{f(z)}{r} \quad (1.69)$$

iar tensiunea se reduce la:

$$\begin{aligned}\tau_{rr} &= -2\mu \frac{f(z)}{r^2} \\ \tau_{\theta\theta} &= +2\mu \frac{f(z)}{r^2} \\ \tau_{rz} = \tau_{zr} &= -\frac{\mu}{r} \frac{df(z)}{dz}\end{aligned}\quad (1.70)$$

Neglijând efectele inerției, ecuația momentului devine,

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rr}) - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} - \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (1.71)$$

care se reduce la:

$$-\frac{dp}{dr} + \frac{\mu}{r} \frac{d^2 f(z)}{dz^2} = 0 \quad (1.72)$$

Ecuția poate fi integrată deoarece presiunea este doar în funcție de  $r$ . Constanta integrată se poate rezolva prin utilizarea următoarelor condiții limită:

$$f(\pm h) = 0 \quad (1.73)$$

Pentru cazul special în care digul se găsește la  $r_1$  iar frontul de curgere la  $r_2$  viteza este dată de relația:

$$u_r(r, z) = \frac{h^2 \Delta p}{2\mu r \ln(r_2/r_1)} \left[ 1 - \left( \frac{z}{h} \right)^2 \right] \quad (1.74)$$

Rata volumetrică de curgere se calculează prin integrarea acestei ecuații ținând cont de aria secțiunii:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_{-h}^{+h} u_z(r, z) r d\theta dz = \frac{4\pi h^3 \Delta p}{3\mu \ln(r_2/r_1)} \quad (1.75)$$

Această ecuație poate fi utilizată pentru rezolvarea presiunii de menținere al frontului de curgere la dig:

$$\Delta p = \frac{3Q\mu \ln(r_2/r_1)}{4\pi h^3} \quad (1.76)$$

$\Delta p$  reprezintă condiția limită pentru a se rezolva distribuția presiunii între cele două discuri prin integrarea ecuației (1.72)

$$p = \frac{\Delta p \ln(r/r_2)}{\ln(r_1/r_2)} \quad (1.77)$$

Pentru prezicerea poziției frontului de curgere  $r_2$  ca funcție de timp pentru început vom iniția ecuația de balans pentru volum sau masă

$$2h\pi(r_2^2 - r_1^2) = Qt \quad (1.78)$$

care poate fi rezolvată pentru  $r_2$  ca fiind:

$$r_2 = \sqrt{\frac{Qt}{2h\pi} + r_1^2} \quad (1.79)$$

Ecuțiile mai sus amintite pot fi folosite în realizarea unor grafice care vizează presiunea la intrarea în dig pentru o viteză de curgere a materialului în funcție de timp (P-V-T). De asemenea aceste formule pot fi utilizate pentru alcătuirea unor grafice specifice distribuției presiunii în timp în diverse puncte de curgere sau rezolvarea unor probleme privind viteza de curgere pentru o presiune de injectare dată. [Osswald, 2006]

### 1.3.1.5. Fluide Newtoniene compresibile

*Modelul Newtonian.* [Bair, 2007] Ecuația constitutivă pentru un lichid Newtonian cu o vâscozitate dinamică  $\mu$  este:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \nu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - p & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \nu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - p & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \mu \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \nu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - p \end{bmatrix} \quad (1.80)$$

unde  $\sigma_{xx}$  reprezintă componenta forței normale pe direcția x și  $\sigma_{xy}$  este componenta forței la forfecare pe direcția x, y al tensorului la forfecare  $\sigma$ . La solicitare normală tensiunea este pozitivă ceea ce conduce la semnul minus în cazul presiunii.[Bair, 2007]

Rata de dilatare este  $(\partial u/\partial x) + (\partial v/\partial y) + (\partial w/\partial z)$  și  $\nu$  este o vâscozitate dilatantă, care, împreună cu  $\mu$  duce la relaxarea volumului în urma schimbării instantanee în presiune mecanică, definită ca:

$$p_m = - \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{3} \quad (1.81)$$

Astfel de detensionări ale volumului pot fi observate pe cale experimentală la presiuni apropiate de temperatura de tranziție vitroasă. La curgerea fluidelor compresibile trebuie să se facă distincție între  $p_m$  și presiunea termodinamică  $p$  care este legată de densitate (sau volum) și temperatură printr-o ecuație de stare. Pentru curgerea compresibilă  $p$  și  $p_m$  sunt evidențiate de ecuația:

$$p_m = p - \left( \nu + \frac{2}{3} \mu \right) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (1.82)$$



### **1.3.2. Fluidele nonnewtoniene, Definiție. Caracteristici definitorii.**

În practica industrială se întâlnesc fluide care prezintă o comportare nonnewtoniană. La aceste fluide în condiții izoterme, dependența tensiune-viteză este neliniară, iar vâscozitatea nu este constantă, depinzând de parametrii sollicitării. Aceste fluide poartă denumirea de *fluide newtoniene*.

O altă definiție a acestor tipuri de fluide poate fi aceea de fluide care nu respectă relația liniară între viteza de forfecare și rata de deformare. Ca exemple de fluide nonnewtoniene amintim: soluții, curgerea de noroi, soluții de polimeri, diverse paste și sângele. Aceste fluide sunt de regulă compoziții complexe și sunt studiate în cadrul reologiei, o știință care se axează pe studiul comportării, curgerii și deformării fluidelor.[Sawhey, 2007]

Fluidele vâscoase nonnewtoniene se împart în două categorii: fluide independente de timp respectiv fluide dependente de timp (vezi fig.1.3).

*Fluidele newtoniene independente de timp* se caracterizează prin aceea că viteza de forfecare dintr-un punct dat este exclusiv dependentă de tensiunea de forfecare din punctul respectiv.

*Fluidele pseudoplaste* sunt fluide care posedă vâscozitate dependentă de structură. Asupra moleculelor prin fluidul pseudoplastic acționează tensiunea de forfecare și mișcarea browniană. La viteze mici de forfecare determinantă este mișcarea browniană, iar creșterea vitezei de forfecare nu produce modificări la nivel de structură.

*Fluidele dilatante* sunt fluide la care în condiții izoterme, vâscozitatea crește odată cu viteza de forfecare. Aceste fluide manifestă fenomenul de îngroșare. Din categoria fluidelor pseudoplastice fac parte soluțiile de polimeri, adezivii, grăsimile, soluțiile de acetat de celuloză etc. Comportarea dilatantă apare la soluțiile care prezintă concentrație mare (pastă de amidon, mortare) dar nu se exclude la unele concentrate de polimeri.

*Fluidele newtoniene dependente de timp* au vâscozitate dependentă de parametrii sollicitării. Aceste fluide solitate la forfecare suferă modificări lente de structură. Comportarea acestor fluide depinde de istoria sollicitărilor (sollicitări la care a fost supus fluidul înaintea experimentului actual). Comportarea dependentă de timp se datorește proceselor de modificare a structurii prin forfecare.

Topitura de polimer este caracterizată ca fiind o curgere nonnewtoniană ce prezintă de obicei un răspuns anormal al curgerii la aplicarea forțelor. Vâscozitatea este dependentă în cazul acestor materiale de viteza de forfecare. Topiturile nu prezintă o proporționalitate în cazul aplicării forțelor precum și a vitezei de curgere.

Dacă există așa-zisa proporționalitate în curgere se poate discuta în acest caz de curgerea Newtoniană. Aceste deviații de la curgerea ideală pot fi de diverse tipuri. Unul dintre aceste moduri denumit vâscozitate aparentă poate să nu fie independent de viteza la forfecare; aceasta poate să crească odată cu creșterea vitezei sau să descrească odată cu viteza de forfecare. Această stare prezentată anterior se găsește frecvent la topiturile de material pulverulent și la soluții. În general dependența între efortul unitar și viteza de forfecare poate fi exprimată ca o lege a puterii.

Diversele materiale termoplastice au de regulă o curgere a topiturii specifică și proprietăți reologice diferite astfel încât curbele/graficele rezultate la curgerea non-newtoniană sunt/să fie diferite.[Rosato, 2001]

Pe de altă parte, proprietățile de curgere ale topiturii de polimer sunt complicate iar controlul procesului necesită o gamă vastă de cunoștințe acumulate

de către ingineri. Pentru a face o comparație cu lichidele simple newtoniene este nevoie de punerea în evidență a unui singur parametru și anume  $\eta$ -vâscozitatea. Vâscozitatea permite conform mecanicii fluidelor calculul tensiunilor pentru orice model de curgere dat, iar topitura de polimer este mai complexă în acest sens.

Problema care trebuie rezolvată pentru a stabili în ce mod va fi prelucrată topitura de polimer în realizarea unor modele solide se bazează pe formularea ecuațiilor de echilibru reologice. Abordarea reologilor în tratarea diverselor probleme de curgere privind polimerii și nu numai este, în general una pur empirică. Obiectivul este găsirea unor expresii analitice care să descrie corect relațiile dintre timp, solicitare și viteză într-un fluid dat.[Strobl, 2007]

### 1.3.2.1 Modele de vâscozitate non-newtoniene

Mai multe modele au fost propuse pentru a descrie dependența vâscozității în funcție de tensiunea/viteza de forfecare. Unul dintre cele mai cunoscute și utilizate modele în aplicațiile tehnice este modelul biparametrizat Ostwald-De Waele dat de relația:

$$\eta = m|k|^{n-1} \quad (1.83)$$

unde  $n < 1$  pentru fluide care sunt supuse unui efort mic și  $n > 1$  pentru fluide supuse unui efort de forfecare ridicat. Un dezavantaj major al modelului îl prezintă faptul că vâscozitatea fluidelor subțiri merge la infinit iar efortul/viteza de forfecare atinge valoarea zero. În general, modelul respectiv oferă valori ridicate anormale pentru vâscozitatea fluidelor subțiri în regiunea în care viteza de deformare/forfecare este foarte mică.

Modelele lui Ellis, Carreau și Cross-Williamson sunt modele triparametrizate. Modelul lui Ellis prezintă vâscozitatea ca fiind în funcție de vâscozitatea solventului  $\eta_0$ , a vitezei de forfecare  $\sigma$ , parametrului  $\sigma_{1/2}$ , care este viteza de forfecare pentru care vâscozitatea este  $\eta_0/2$ , și un parametru adimensional  $\alpha$ . Ecuația în acest caz este următoarea:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left| \frac{\sigma}{\sigma_{1/2}} \right|^{\alpha-1}} \quad (1.84)$$

Modelul prezice faptul că vâscozitatea este zero la o viteză de forfecare cu valori mici și la valori mai mari de  $k$ , modelul prezice un comportament mic la forfecare în timp ce vâscozitatea este subapreciată la viteze de forfecare ridicate.

Modelul Carreau este în funcție de  $\eta_0$ , o caracteristică de timp  $t_1$  și un parametru adimensional  $n$  și ecuația reprezentativă a acestuia poate fi scrisă astfel:

$$\eta = \frac{\eta_0}{\left[ 1 + (t_1 k)^2 \right]^{(1-n)/2}} \quad (1.85)$$

Deși modelul prezice foarte bine variația vâscozității în funcție de viteza de forfecare pentru soluțiile de polimer, vâscozitatea este puțin subestimată la o viteză egală cu zero.

Modelul Cross-Williamson se exprimă cu ajutorul relației:

$$\eta = \frac{\eta_0}{[1 + (t_1 k)]^{1-n}} \quad (1.86)$$

Acest model oferă o dependență bună a vitezei de forfecare în funcție de vâscozitate pentru polimerii ce prezintă solicitări mici. De asemenea s-au propus modele de tip patru sau cinci-parametrizate iar un exemplu în acest sens îl reprezintă modelul Cross-Williamson la care relația devine:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + |t_1 k|^{1-n}} \quad (1.87)$$

atunci când  $\eta_\infty$  reprezintă vâscozitatea dacă  $k \rightarrow \infty$ . [Riande, 2000]

### 1.3.2.2. Curgerea izotermală în canale la fluidele non-newtoniene

Pentru determinarea curgerii în acest caz trebuie să utilizăm relația de mai jos care reprezintă punctul de pornire pentru analiza oricărui fluid:

$$\tau = \frac{r}{2} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (1.88)$$

iar

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{\partial v}{\partial r} \quad (1.89)$$

astfel încât:

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{r}{2\eta} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (1.90)$$

de unde rezultă:

$$\eta = \eta_0 \left[ \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right]^{n-1} = \eta_0 \left[ \frac{\partial v / \partial r}{\dot{\gamma}_0} \right]^{n-1} \quad (1.91)$$

apoi din ecuațiile:

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{r}{2\eta_0 \left[ \frac{\partial v / \partial r}{\dot{\gamma}_0} \right]^{n-1}} \cdot \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (1.92)$$

$$\left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^n = \frac{r (\dot{\gamma}_0)^{n-1}}{2\eta_0} \cdot \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (1.93)$$

Prin integrarea acestor ecuații între limitele-Viteza =V la raza=r precum și viteza=0 la raza=R. Ecuația vitezei pentru orice rază poate fi scrisă astfel:

$$V = \left( \frac{n}{n+1} \right) \dot{\gamma}_0^{(n-1)/n} \left[ \frac{\partial P / \partial z}{2\eta_0} \right]^{1/n} \left[ r^{(n+1)/n} - R^{(n+1)/n} \right] \quad (1.94)$$

La  $r=0$  și  $V=V_0$  vom avea

$$V_0 = - \left( \frac{n}{n+1} \right) \dot{\gamma}_0^{(n+1)/n} \left[ \frac{(\partial P) / (\partial z)}{2\eta_0} \right]^{1/n} R^{(n+1)/n} \quad (1.95)$$

$$V = V_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right] \quad (1.96)$$

Debitul Q este dat de relația:

$$Q = \int_0^R 2\pi r V dr = 2\pi V_0 \int_0^R r \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right] dr \quad (1.97)$$

$$Q = \left( \frac{n+1}{3n+1} \right) \pi R^2 V_0 \quad (1.98)$$

prin urmare viteza la forfecare,

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ V_0 \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right) \right] \quad (1.99)$$

$$\dot{\gamma} = - \frac{\left( \frac{n+1}{n} \right) V_0}{R} \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^{1/n} \quad (1.100)$$

Viteza de forfecare la perete se obține din egalitatea  $r=R$  iar dacă  $V_0$  se înlocuiește cu Q ecuația devine:

$$\dot{\gamma}_\omega = - \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \frac{4Q}{\pi R^3} [332] \quad (1.101)$$

### 1.3.2.3. Fluidul linear a lui Maxwell

Modelul lui Maxwell constă dintr-un arc și un amortizor legate în serie așa cum se prezintă în figura 1.5. Acest model poate fi analizat în următorul mod.

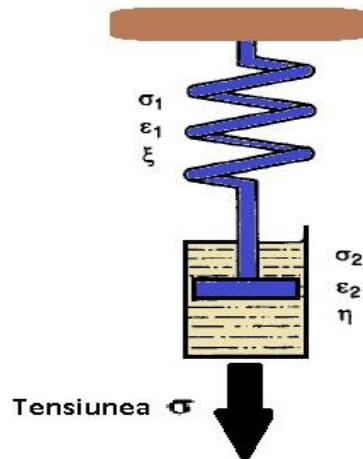


Fig.1.5. Modelul lui Maxwell [Crowford,2004]

Relațiile tensiune-deformație. Arcul este o componentă elastică de răspuns care se supune relației:

$$\sigma_1 = \xi \cdot \varepsilon_1 \quad (1.102)$$

unde  $\sigma_1$  și  $\varepsilon_1$  reprezintă tensiunea și deformația respectiv  $\xi$  este o constantă. Amortizorul este considerat componentul de răspuns al vâscozității și în acest caz tensiunea  $\sigma_2$  este proporțională cu/pe tensiunea  $\dot{\varepsilon}_2$

$$\sigma_2 = \eta \cdot \dot{\varepsilon}_2 \quad (1.103)$$

unde  $\eta$  este o constantă de material.

Ecuția de echilibru la o tensiune aplicată în cazul ariei constante se scrie cu ajutorul relației:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (1.104)$$

Ecuția de deformare geometrică. Tensiunea totală  $\varepsilon$  este egală cu suma tensiunilor din cele două elemente, astfel;

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (1.105)$$

Din ecuațiile anterioare rezultă:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\xi} \dot{\sigma}_1 + \frac{1}{\eta} \dot{\sigma}_2 \quad (1.106)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\xi} \cdot \dot{\sigma} + \frac{1}{\eta} \sigma$$

ceea ce reprezintă ecuația guvernantă a modelului Maxwell. [Crowford,2004]

Dacă se aplică o tensiune constantă  $\sigma_0$  ecuația anterioară devine:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_0 \quad (1.107)$$

care indică o viteză ridicată constantă a tensiunii în funcție de timp, iar la timpul  $t$  ecuația devine:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\xi} + \frac{\sigma_0}{\eta} t \quad (1.108)$$

Prin urmare modulul de elasticitate este dat de relația:

$$E(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} = \frac{\xi \eta}{\eta + \xi t} \quad (1.109)$$

Dacă tensiunea devine constantă rezultă ecuația:

$$0 = \frac{1}{\xi} \cdot \dot{\sigma} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (1.110)$$

Prin rezolvarea acestei ecuații diferențiale la condițiile inițiale  $\sigma = \sigma_0$  la  $t=t_0$  obținem

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\frac{\xi}{\eta} t} \quad (1.111)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/T_R}$$

unde  $T_R = \eta/\xi$  se referă la timpul de relaxare. Aceasta indică faptul că tensiunea scade exponențial cu o constantă de timp a lui  $\eta/\xi$ . [Crowford,2004][Lai, 1999]

#### **1.4. Modelarea matematică și modele non-newtoniene.**

Modelarea matematică pentru diversele aplicații privind materialele termoplastice poate fi utilizată pentru a reduce timpul necesar realizării și dezvoltării de noi produse și procese de producție precum și optimizarea proceselor actual existente.[Asua, 2007] În acest sens pentru a evidenția scopul modelelor matematice în tehnică se prezintă o serie de caracteristici ale acestora:

(i) Modelele au rolul de a îmbunătăți înțelegerea utilizatorului și familiarizarea acestuia cu diferite procese.

(ii) Modelele sunt utile în procesul de proiectare, de alegere și selectare a parametrilor precum și în simularea proceselor.

(iii) Modelele sunt utile pentru optimizarea procesului

(iiii) Modelele sunt utilizate din considerente de siguranță

(iiiiii) Modelele prezintă importanță pentru selectarea unor senzori optimi precum și pentru testare.[Asua, 2007]

Atunci când un inginer tehnolog se confruntă cu probleme de control una dintre primele sarcini ale acestuia este dezvoltarea unui model matematic al procesului astfel încât acesta să poată fi controlat în scopul rezolvării clare a problemei. Practic, există doar câteva modalități prin intermediul diverselor programe pentru a genera modelul dorit.[Passino, 1998]

Se pot folosi primele principii ale fizicii pentru a scrie un model matematic sau se poate efectua un sistem de identificare a problemei prin utilizarea de date reale din producție pentru a produce un model al problemei.

Uneori, o abordare combinată între cele două amintite anterior este utilizată în cazul în care vom folosi fizica pentru a scrie o ecuație diferențială generalizată care credem că reprezintă comportamentul teoretic iar apoi vom efectua experimente pe plan teoretic pentru a determina anumiți parametri de funcționare ai modelului.[Passino, 1998]

De cele mai multe ori se constată că în practică se produce mai mult de un singur model matematic. Un "model real" este considerat a fi unul care este realizat pentru a fi cât mai aproape de realitate astfel încât datele obținute să poată fi utilizate în evaluările bazate pe simulări. Trebuie să înțelegem faptul că niciodată nu există un model matematic perfect pentru un anumit plan sau proces.

Modelul matematic reprezintă un lucru abstract și prin urmare, nu poate reprezenta perfect toate fenomenele dintr-un proces fie el de orice natură.

Aceste afirmații nu sunt menite pentru a spune că nu putem produce modele care să fie "suficient de exacte" ci pentru a reprezenta îndeaproape comportamentul unui sistem fizic. De obicei inginerii când lucrează în această ramură ce ține de control sunt instruiți că pot utiliza orice model matematic apropiat pentru identificarea, simularea și realizarea problemei. De asemenea adesea este nevoie ca modelul ales în simulare să fie foarte precis pentru ca mai apoi, să fie testat într-un cadru experimental. În practică se merge des pe realizarea unor modele matematice simple, dar care să ofere rezultate satisfăcătoare în realizarea problemei și a constrângerilor pe care aceasta le impune. Modele liniare cum sunt ecuațiile liniare s-au folosit pe scară largă și intensiv în trecut pentru rezolvarea diverselor probleme în tehnică, iar teoria de control pentru sistemele liniare este destul de matură, iar rezultatele sunt în cele mai multe cazuri satisfăcătoare.

Există anumite proprietăți specifice ale proceselor sau planului de lucru pe care inginerul tinde de cele mai multe ori să le identifice în procesul de concepție. De exemplu se dorește să se cunoască dacă procesul urmărit este stabil iar dacă anumite variabile rămân aceleași sau se vor modifica. De asemenea, se va încerca să se facă o evaluare generală a rezultatelor obținute în cadrul procesului în diverse stadii sau condiții de lucru și chiar pe o perioadă delimitată de timp prin punerea în evidență a efectelor aleatorii prezente asupra procesului.

#### **1.4.1. Definiție. Caracteristicile modelării matematice.**

Modelarea matematică prezintă următoarele caracteristici: obiective privind performanța și restricții de design, realizarea unui controler sau postprocesor și evaluarea performanțelor acestuia. Un proiect privind controlul unui proces presupune construirea unui controler/procesor pentru a satisface specificațiile sau constrângerile din proces.

În cadrul modelării matematice pentru a realiza un controler care să satisfacă condițiile impuse și să se obțină o serie de rezultate concludente acesta trebuie să prezinte o serie de caracteristici: să fie un controler clasic sau proporțional integral-derivat, să aibă metode de rezolvare în spațiu și timp, să fie ușor de controlat, controlul procesului să fie optim chiar adaptabil dacă se poate, să prezinte metode nonlineare și stocastice de control.

Următorul pas în procesul de proiectare este realizarea analizei și evaluarea performanțelor printr-un test specific sistemului de control conceput și realizat. De regulă există trei modalități generale de a verifica dacă un sistem de control funcționează corect: analiza matematică bazată pe modele formale utilizate, analiza unor simulări bazate pe utilizarea modelelor formale și realizarea unor investigații experimentale pe sistemul real. În analiza bazată pe simulare se încercă dezvoltarea unui model de simulare bazat pe sistemul fizic. Acest fapt poate implica utilizarea unui model matematic și probabil a unor date reale ce pot fi folosite pentru a specifica o serie de parametrii ai modelului. [Kutz, 1998]

Modelul din simulare poate da adeseori date și rezultate destul de precise și poate respecta chiar restricții impuse modelului sau procesului analizat. Adesea simulările sunt realizate pe calculatoare digitale cu o memorie mare și un timp de răspuns rapid, dar există situații în care un calculator analog este destul de util în special pentru simularea în timp real a sistemelor complexe sau în anumite încercări de laborator.

Indiferent de metoda utilizată pentru a dezvolta simulările vor exista întotdeauna limitări, la fel ca în cazul analizei matematice unde rezultatele nu vor fi niciodată perfect corecte, sau unde anumite proprietăți nu vor putea fi verificate pe deplin în simulare. De exemplu simulările pot rula doar pentru o cantitate finită de timp și doar pentru un număr finit de condiții astfel încât modelul virtual să se transforme în model real. Pentru a efectua cercetări experimentale privind performanța asupra unui sistem de control, acesta va fi supus unor serii de teste în condiții diferite de funcționare.

#### **1.4.2. Modelul Navier-Stokes**

O generalizare similară cu o curgere multidimensională este necesară și în cazul ecuațiilor constitutive non-newtoniene. Ecuațiile lui Navier-Stokes sau a curgerii non-newtoniene pentru un fluid în coordonate carteziane sunt redactate astfel:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (1.112)$$

Dacă ecuațiile sunt notate vectorial obținem:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (1.113)$$

Termenii de presiune și de greutate din relație pot fi combinați prin înlocuirea presiunii inițiale  $p$  cu o presiune echivalentă  $P$ . Termenii care se găsesc în partea stângă a ecuațiilor Navier-Stokes sunt termeni inerțiali în timp ce termenii care se găsesc în partea dreaptă a ecuației și includ vâscozitatea  $\mu$  sunt termeni vâscoși. Cazurile în care ecuațiile Navier-Stokes pot fi simplificate sunt limitate la curgerea cu alunecare, acest fapt realizându-se doar în cazul în care termenii inerțiali sunt neglijați sau în cazul curgerii irotaționale în care se neglijează termenii vâscoși. [Perry, 1997], [Yamaguchi, 2008]

Deoarece ecuațiile Navier-Stokes sunt de gradul întâi privind presiunea și de gradul doi privind viteza soluția lor necesită o condiție limită pentru presiune și două condiții limită pentru fiecare componentă a vitezei astfel încât să se obțină soluția completă. Cele mai multe probleme apar în cazul în care avem condiția de curgere fără alunecare, care impune ca viteza fluidului să fie egală cu viteza de pe orice suprafață de separație solidă. În soluțiile numerice ale ecuațiilor Navier-Stokes condițiile la limită Dirichlet și Neumann pot fi îndeplinite prin mijloace diferite de rezolvare. [Perry, 1997]

### 1.4.3. Modelul fluidului vâscos non-newtonian

Considerăm că avem un fluid cu o curgere vâscoasă neliniară. [Wegner, 2009] Modelul se consideră a fi varianta incompresibilă a fluidului Reiner-Rivlin sau Stokes și se definește prin relațiile:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \alpha_1 \mathbf{D} + \alpha_2 \mathbf{D}^2, \text{tr} \mathbf{D} = 0, \quad (1.114)$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \alpha_1 d_{ij} + \alpha_2 d_{ik}d_{kj}, d_{kk} = 0,$$

unde  $p$  se determină din condițiile la limită. Parametrii  $\alpha_1$  și  $\alpha_2$  sunt în funcție de invariantul  $D$  și temperatura posibilă iar  $\alpha_1/2$  poate fi considerată vâscozitatea iar  $\alpha_2$  este văzută ca vâscozitatea aparentă. La incompresibilitate  $D$  se modifică astfel încât are loc egalitatea  $D = D'$ , invariantul  $D$  neavând valoarea zero de unde rezultă relațiile:

$$I_1 = 0, \quad I_2 = -\frac{1}{2} \text{tr} \mathbf{D}'^2, \quad I_3 = \text{Det}[\mathbf{D}'] = \frac{1}{3} \text{tr} \mathbf{D}'^3. \quad (1.115)$$



Ecuția (1.114) indică faptul că  $\sigma + pI$  este în concordanță cu efectul vâscozității de unde rezultă:

$$P = \alpha_1 trD^2 + \alpha_2 trD^3 \tag{1.116}$$

care este egală cu viteza de disipare a energiei mecanice. Urmează apoi ecuația:

$$\alpha_1 trD^2 + \alpha_2 trD^3 \geq 0 \tag{1.117}$$

care este condiția necesară ca ecuația (1.114) să fie aplicabilă. [Wegner, 2009]

#### 1.4.4. Modelul Hele-Shaw

Modelul Hele-Shaw [Osswald, 2006] este considerat a fi cel mai utilizat dintre modele privind simularea de curgere în procesarea materialelor polimerice sau purverulente fie prin injectare, extrudare, injectarea prin compresiune etc. Datorită faptului că digul utilizat este mic astfel încât predomină relația  $h \ll L$  iar dimensiunile digului pot varia avem:

$$\frac{\partial h}{\partial x} \ll 1 \text{ și } \frac{\partial h}{\partial y} \ll 1 \tag{1.118}$$

O curgere de tip Hele-Shaw pentru o piesă din material polimeric este reprezentată în figura 1.6.

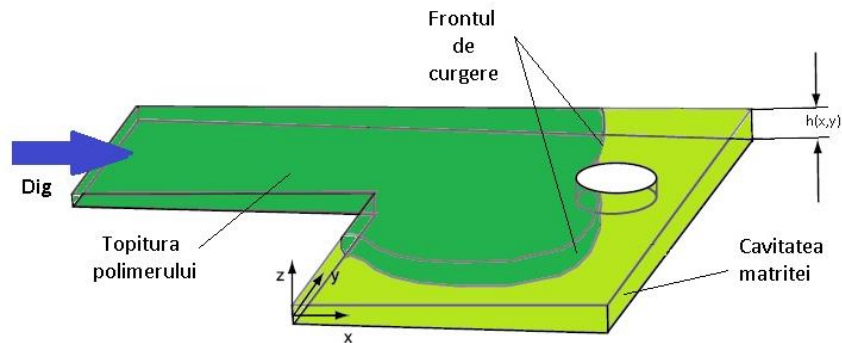


Fig.1.6. Curgerea Hele-Shaw [adaptat după Osswald, 2006]

Vom începe prin derivarea ecuației de continuitate:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{1.119}$$

Valorile caracteristice ale variabilelor prezente în ecuația anterioară sunt redată de:

$$\begin{aligned} u_x, u_y &\ll U_c & u_z &\ll U_z \\ x, y &\ll L & z &\ll h \end{aligned}$$

Substituind acestea în termenii x și y ai ecuației (1.119) rezultă:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}, \frac{\partial u_y}{\partial y} \ll \frac{U_c}{L} \tag{1.120}$$

și termenul z în

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} \approx \frac{U_c}{h} \quad (1.121)$$

Cu ajutorul ecuației de continuitate și pentru viteza lui x,y putem să rezolvăm scala vitezei pentru z astfel:

$$U_z = \left(\frac{h}{L}\right) U_c \quad (1.122)$$

Dacă  $u_z \ll u_x, u_y$  și  $u_z$  poate fi ignorat, trebuie să punctăm aici faptul că viteza joacă un rol important în transferul de căldură și orientarea curgerii materialului deoarece frontul de curgere liber se referă de regulă la curgerea turbulentă. Prin urmare vom scrie ecuația de balans a momentului:

$$\rho \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (1.123)$$

Conform cu amplitudinea termenilor inerției rezultă:

$$\rho u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \approx \rho \frac{U_c^2}{L} \quad (1.124)$$

$$\rho u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \approx \rho \frac{U_c U_c}{h} \approx \rho \frac{U_c^2}{L} \quad (1.125)$$

Din aceasta rezultă amplitudinea tensiunii:

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \approx \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \approx \frac{\eta U_c}{L^2} \quad (1.126)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \approx \frac{\eta U_c}{h^2}$$

În cazul curgerii topitului de polimer numărul lui Reynolds are relația  $Re = \rho U_c h / \eta$  și este de regulă  $\ll 10^5$  cu excepția cazului injectării prin reacție unde  $Re \rightarrow 1-100$  la dig.[Osswald, 2006] Condițiile geometrice și dinamice ale curgerii aplicate în cazul modelului Helle-Shaw simplifică ecuația de moment iar sistemul de ecuații format este următorul:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (1.127)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (1.128)$$

În conformitate cu ecuația (1.122) din ecuația momentului rezultă:

$$\frac{\partial p}{\partial z} \approx \frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1.129)$$

care indică faptul că doar  $p = p(x, y)$ . Prin urmare pentru un fluid Newtonian generalizat vom nota ecuația constitutivă:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1.130)$$

unde vâscozitatea este o funcție de temperatură și tensorul ratei de deformație.

Dacă vom amplifica analiza termenului tensorului amintit rezultă ecuația:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z}\right)^2} \quad (1.131)$$

Integrând tensiunea cu respectarea direcției lui z obținem:

$$\tau_{zx} = \frac{\partial p}{\partial x} + c_1 \quad (1.132)$$

Simetria pentru profilul vitezei v-a fi setat la  $c_1 = 0$ .

Din ecuația constitutivă a fluidului Newtonian obținem:

$$\frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{z}{\eta} \quad (1.133)$$

din care prin integrare

$$\bar{u}_x = \frac{1}{h/2} \int_0^{h/2} u_x(z) dz \quad (1.134)$$

Substituind ecuația (1.133) în ecuația (1.134) rezultă:

$$\bar{u}_x = \frac{1}{h/2} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right) \int_0^{h/2} \int_{h/2}^z \frac{z' dz'}{\eta(z')} dz \quad (1.135)$$

integrând aceasta se modifică astfel:

$$\int_0^{h/2} \int_z^{h/2} dz' dz \rightarrow \int_0^{h/2} \int_0^{z'} dz dz' \quad (1.136)$$

Prin urmare putem scrie:

$$\bar{u}_x = \frac{-1}{h/2} \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^{h/2} \int_0^{z'} \frac{z'}{\eta(z')} dz dz' \quad (1.137)$$

iar prin integrare duce la

$$\bar{u}_x = -\frac{2}{h} \frac{\partial p}{\partial x} S \quad (1.138)$$

unde S se referă la conductanța curgerii dată de:

$$S = \int_0^{h/2} \frac{z'^2}{\eta(z')} dz' \quad (1.139)$$

Utilizând aceasta putem defini intervalul mediu al vitezei prin relația:

$$\begin{aligned} \bar{u}_x &= -\frac{2S}{h} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \bar{u}_y &= -\frac{2S}{h} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (1.140)$$

unde  $S = S(x, y)$ . Este important să se noteze:

$$\frac{u_y(x, y, z)}{u_x(x, y, z)} = \frac{\frac{\partial p}{\partial y}(x, y)}{\frac{\partial p}{\partial x}(x, y)} \quad (1.141)$$

ceea ce înseamnă că viteza își schimbă amplitudinea prin dig dar nu și direcția de curgere. Se va utiliza în continuare ecuația de continuitate și se va integra peste z

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h/2} u_x dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^{h/2} u_y dz = 0 \quad (1.142)$$

Integrarea ecuației de continuitate este forma slabă a ecuației de continuitate generală. Aceasta este notată în soluțiile numerice ale problemelor de curgere în matriță unde continuitatea nu este niciodată satisfăcută. Ecuația integrată de continuitate se reduce la

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h}{2} \bar{u}_x \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h}{2} \bar{u}_y \right) = 0 \quad (1.143)$$

Substituind intervalul mediu al vitezei obținem:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (1.144)$$

[Osswald, 2006], [Kundu, 2002]

#### 1.4.5. Modelul lui Ostwald de Waele

Relația dintre tensiunea de forfecare și viteza de forfecare reprezentate în coordonate dublu logaritmice pentru un fluid supus la forfecare redusă poate fi aproximat printr-o linie dreaptă peste o limită a vitezei de forfecare. Pentru această formă a curbei de curgere se aplică o expresie de forma următoare:

$$\tau_{yx} = m \left( \dot{\gamma}_{yx} \right)^n \quad (1.145)$$

astfel încât vâscozitatea aparentă pentru fluidul Ostwald de Waele [Bair, 2007] este dată de relația

$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = m \left( \dot{\gamma}_{yx} \right)^{n-1} \quad (1.146)$$

Pentru:

$n < 1$ , fluidul prezintă proprietăți de forfecare mici;

$n = 1$ , fluidul prezintă o comportare specific Newtoniană;

$n > 1$ , fluidul prezintă o comportare la forfecare mare.

În aceste ecuații,  $m$  și  $n$  sunt doi parametri empirici mai exact consistența coeficientului de fluid respectiv indicele de curgere. Pentru un fluid cu o deformație mică indicele poate avea orice valoare între 0 și 1. Cu cât valoarea lui  $n$  este mai mică, cu atât mai mare este gradul minim de forfecare. Pentru un fluid cu un grad de forfecare maxim indicele  $n$  va fi mai mare decât unitatea/masa.

Dacă  $n=1$ , ecuațiile (1.145) și (1.146) se reduc la ecuația de stare a comportamentului de fluid newtonian. Se remarcă faptul că dimensiunile coeficientului de curgere  $m$  depind de valoarea numerică a lui  $n$  și valorile lui  $m$  nu

trebuie să fie comparate în cazul în care valorile lui  $n$  diferă. Pe de altă parte, valoarea lui  $m$  poate fi privită ca valoarea vâscozității aparente la viteza de forfecare totală ce va depinde de timp. În ciuda faptului că există o serie de limitări se constată că acest model este cel mai utilizat în literatura de specialitate privind aplicațiile proceselor inginerești. În cele din urmă fiecare fluid care prezintă o comportare non-newtoniană este unic în felul său, iar comportamentul său reologic trebuie studiat și evaluat corespunzător și în mod direct.

### **1.5. Concluzii.**

Matematica reprezintă o știință exactă care utilizează o serie de formule și algoritmi cu ajutorul cărora se rezolvă diversele aplicații sau probleme, din algebră, analiză matematică, geometrie sau trigonometrie, care se regăsesc în viața reală.

Din cele mai vechi timpuri până în prezent omenirea a rezolvat problemele existențiale cu ajutorul matematicii sau fizicii. Astfel savanții lumii cu ajutorul teoremelor, legilor sau postulatelor formulate au oferit lumii un suport minim de cunoștințe chiar dacă unele erau abstracte menite să rezolve diverse probleme. Acest fapt a oferit lumii o serie de descoperiri din diverse domenii în special în cel tehnic.

Unul dintre cele mai importante descoperiri îl reprezintă calculatorul cu ajutorul căruia se rezolvă o serie de probleme din lumea în care trăim sau din interiorul unei firme. Prin urmare acesta este utilizat pe scară largă pentru transmiterea de informații, realizarea unor statistici, analiza și pentru rezolvarea diverselor probleme pentru ingineri prin softurile utilizate.

Majoritatea programelor cu care inginerii lucrează sunt bazate pe algoritmi matematici sau modele matematice menite să rezolve diverse probleme. Cu ajutorul calculatorului sunt realizate diverse piese noi sau se îmbunătățesc cele vechi prin intermediul softurilor CAD; sunt generate traiectorii ale sculelor așchietoare în vederea prelucrării unui produs în CAM; sunt generate grafice sau solicitări de rezistență materialelor sau simulări de curgere în mediile de lucru care se bazează pe analiza cu elemente finite (FEM sau CAE).

## Cap. II. – Curgerea materialelor termoplastice prin rețelele și cavitățile matritelor.

### 2.1. Tipuri de polimeri.

Materialele plastice sunt materiale obținute din polimeri ce sunt prelucrate la temperaturi înalte în scopul obținerii produsului finit. La temperatură și presiune normală materialele plastice sunt relativ dure, fără proprietăți plastice și puțin elastice.

Un polimer este un compus obținut printr-o înlănțuire a unui număr mare de molecule simple denumite monomeri iar procesul chimic de înlănțuire, de formare a unei macromolecule [Strobl, 2007] de polimer cu ajutorul unor reacții chimice identice se numește *polimerizare* [Iclanzan, 2006], [Ryntz, 2003]

Macromoleculele polimerilor sunt alcătuite din grupe de atomi care se repetă mai mult sau mai puțin ordonat în lungul catenei, grupe numite unități structurale sau meri.[Sawhey, 2007] Numărul de meri ai unei molecule reprezintă gradul de polimerizare. Macromoleculele care prezintă interes din punct de vedere tehnologic sunt acelea a căror masă moleculară depășește 10.000.

Numele de polimer se formează de regulă la majoritatea materialelor plastice (excepție fac copolimerii) prin atașarea prefixului „poli” monomerului sau reactantului principal din care este alcătuit polimerul. [Brandrup, 1998] [Rubinstein,2003], [Ryntz,2003]

Polimerii se pot clasifica după origine în: naturali, artificiali și sintetici; după aplicația acestora pot fi: pe scară largă (polimeri comuni), tehnici (materiale plastice ingineresti) și funcționali (aplicații speciale); după structură: liniari (monodimensionali), bidimensionali și tridimensionali. [Gnanou, 2008]

Procesul de *polimerizare* în cursul căruia se leagă între ele molecule de acelaș fel poate fi reprezentat prin schema  $nA \rightarrow (A)_n$  în care A este monomerul, iar n este gradul de polimerizare. În general există trei moduri prin care se pot obține polimerii sintetici pornind de la materialul de bază: polimerizarea prin adiție, polimerizarea prin condensare (copolimerizare) și polimerizarea prin rearanjare.[Wintermantel, 2009], [Erhard, 2006]

Alte tipuri de obținere a materialelor plastice prin polimerizare o reprezintă polimerizarea prin creștere pas cu pas sau polimerizarea prin creșterea lanțului care poate fi: ionică, polimerizarea cationică (centrul activ este un cation), polimerizarea anionică (centrul activ este un anion), polimerizarea radicalilor liberi (centrul activ este un radical) respectiv polimerizarea Ziegler-Natta sau polimerizarea coordonată (centrul activ îl reprezintă o parte activă a unui catalizator).[Wintermantel, 2009], [Gnanou, 2008], [Asua, 2007], [Kaiser, 2006]

În vederea întrebunțării lor tehnice materialele polimerice se pot caracteriza sau clasifica luând în considerare comportarea termomecanică, care ține seama de variația deformației unui material polimeric sub sarcină constantă, în funcție de temperatură. Din punct de vedere al comportării termomecanice se deosebesc următoarele grupe de polimeri : termoplaste, termorigide, elastomeri.[Michaeli, 2001] În figura 2.1 se poate observa o clasificare a materialelor polimerice precum

și o serie de exemple specifice fiecărei grupe prezentate. Putem afirma de asemenea, faptul că un material plastic este un polimer ce prezintă diverse proprietăți ridicate, care într-un anumit stadiu al existenței sale este capabil să curgă dar poate fi adus într-o formă non-fluidă în care prezintă proprietăți de rezistență ridicate capabile să satisfacă condițiile de lucru pentru care produsul a fost creat. [Sheir, 2000]

*Termoplastele* sunt polimeri sau materiale plastice rigide la temperatura ambiantă care prin creșterea temperaturii se înmoaie și prin răcire se rigidizează din nou. [Kaiser, 2006] Procesul este reversibil. Materialele termoplastice pot fi clasificate în patru sub-clase: materiale termoplastice amorse, termoplastice amorse cauciucate, materiale termoplastice amorse plasticizate și materiale termoplastice cristaline. [Sheir, 2000], [Oberg, 2008]

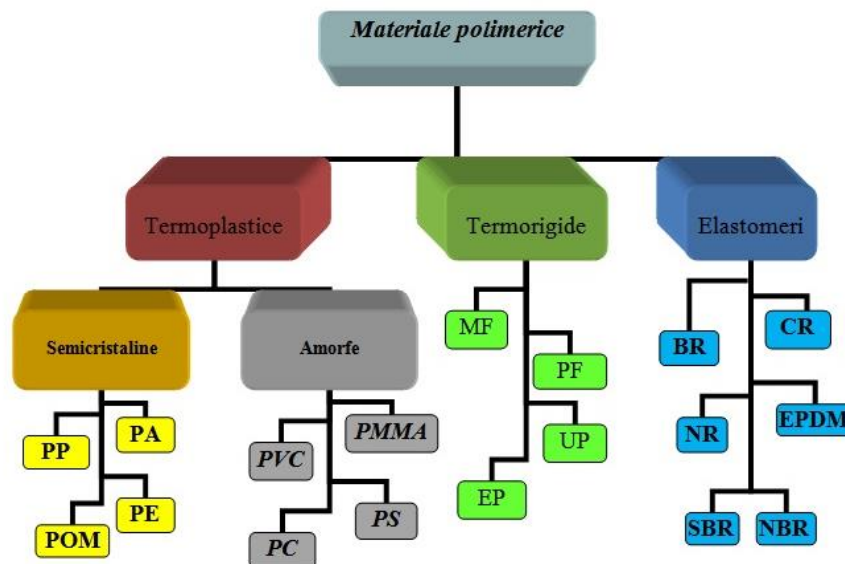


Fig.2.1. Clasificarea materialelor polimerice cu exemplificări [adaptat Michaeli, 2001]

În cazul materialelor termoplastice se constată că, pentru ca moleculele să se întrepătrundă trebuie să existe o temperatură certă care să le determine să aibă destulă energie încât să se formeze o atracție intermoleculară. Cu alte cuvinte la o anumită temperatură materialul este capabil să curgă el fiind plastic iar sub această temperatură materialul se solidifică.

*Termorigidele* sunt polimeri sau materiale plastice rigide la temperatura ambiantă. [Oberg, 2008], [Kaiser,2006] Prin creșterea temperaturii se provoacă o descompunere ireversibilă. Materialele termorigide prezintă marele dezavantaj că nu pot să fie reprocessate [Gooch, 2002] în comparație cu materialele termoplastice care pot fi reprocessate după reciclare la o temperatură mai mică decât cea normală de procesare. [Harper, 2000], [Smallman, 1999] Datorită faptului că materialele termorigide au o formă iregulată acestea sunt materiale amorse și prezintă o structură a rețelei moleculare rigidă. [Sheir, 2000]

*Elastomerii* sunt polimeri sau materiale plastice care au un comportament de cauciuc la temperatura mediului ambiant. [Erhard, 2006] Un elastomer este un material cu o comportare de cauciuc care se consideră că la temperatura camerei se

întinde sub o forță mică cu o lungime dublă față de cea inițială și revine apoi la lungimea aproximativ inițială avută într-o anumită perioadă de timp dacă forța respectivă a fost îndepărtată.[Rosato, 2001], [Brydson, 1999], [Oberg, 2008]

Elastomerii au două caracteristici specifice: temperatura de tranziție vitrosă care este sub cea la care aceștia sunt deseori utilizați și moleculele acestora care sunt extrem de răsucite ( ex: izoprenul). Atunci când se aplică o forță asupra materialului lanțurile moleculare se pot prelungi cu câteva sute de procente. Unele materiale cu o comportare de cauciuc au un modul de elasticitate inițial mai mic de 10 MPa iar odată cu alungirea moleculelor modulul de elasticitate crește.

Dacă o moleculă de polimer are o structură suficient de regulată poate fi în măsură să prezinte un anumit grad de *cristalinitate* ceea ce duce la realizarea unor polimeri cristalini. Se poate spune că fenomenul de cristalinitate este limitat la anumiți polimeri liniari sau ușor ramificați, ce prezintă o structură regulată ridicată. Prezența unor regiuni cristaline într-un polimer are efecte majore asupra proprietăților de densitate, rigiditate și claritate ale materialului.[Brandrup, 1998]

Diferența majoră între conceptul tradițional de structură cristalină și polimer cristalin este că primul este un singur cristal iar polimerul este un policristal. Printr-un singur cristal se înțelege o particulă cristalină crescută fără întrerupere având un nucleu unic și fiind lipsit de defecte. Termenul de *policristalinitate* se referă la o stare în care grupuri de monocristale sunt implicit dezvoltate/crescute mai mult sau mai puțin din mai multe nuclee ceea ce duce ca acel conglomerat care rezultă să poată fi asimetric. Policristalinitatea reprezintă un proces care nu are loc numai în polimeri ci și în metale.[Erhard, 2006]

Teoriile de cristalinizare în polimeri s-au modificat în decursul anilor. Un timp îndelungat s-a crezut că fenomenul cristalinității se bazează pe cristalite mici de ordinul a câteva sute de unități Angstrom în lungime. Aceste unități sunt foarte mici în comparație cu lungimea unei molecule de polimer. Cristalitele erau considerate a fi alcătuite dintr-o serie de molecule aranjate într-o ordine regulată.

Această teorie cunoscută sub denumirea de teoria moleculei/micelului sau teoria franjurilor cristalinizate a ajutat la explicarea multor proprietăți ale polimerilor cristalini dar a fost dificil să se explice formarea anumitor structuri mai mari, cum ar fi sferulele care au un diametru mai mare de 0,1 mm. [Blythe, 2005] În urma unor lucrări axate pe materiale specifice s-a constatat că această teorie nu a fost în totalitate adevărată.

De asemenea, s-a constatat că în multe situații moleculele de polimer aflate la intervale de aproximativ 100 Å formau lamele care par a fi unități fundamentale într-o masă de polimer cristalin. Cristalizarea se răspândește prin creșterea lamelor individuale iar moleculele de polimeri se aliniază într-o poziție și încep să se încrucșeze. Din diverse motive cum ar fi un punct de ramificare sau alte neregularități în structura unei molecule creșterea s-ar realiza în mai multe direcții.

Efectul în acest caz ar fi o creștere exterioară din nucleu și creșterea sferulitelor. În acest concept o sferuliță este cauzată de creșterea structurii cristaline inițiale, în timp ce teoria micelului sau franjurilor este postulată de faptul că formarea unei sferulite necesită o reorganizare considerabilă a dispunerii/aranjării cristalitelor. Ambele teorii sunt în concordanță cu multe efecte observate în cazul polimerilor cristalini. Cu cât moleculele sunt mai compacte în material cu atât densitatea acestuia crește. Distanțele intermoleculare scăzute vor crește forțele secundare care țin lanțul molecular compact și vor crește de asemenea valoarea proprietăților de rezistență la tracțiune, rigiditate și a punctului de topire.

Nucleele omogene se produc atunci când, ca urmare a unei mișcări segvențiale statistice aleatoare câteva segmente adoptă aceeași structură pe care



acestea ar avea-o într-un cristal. Prin definiție cristalizarea nu apare peste punctul de topire al materialului.

Polimerii care prezintă o structură cu molecule mari sunt de obicei mai transparentți decât ceilalți. În multe produse din material polimeric este de dorit să avem un grad ridicat de cristalinitate dar cu dimensiuni mici ale sferulitelor.[Brandrup, 1998] O rată de omogenizare ridicată necesită ca polimerii să fie menținuți la o temperatură între temperatura de tranziție vitrosă și punctul de topire. Rata înaltă de formare a nucleelor poate fi atinsă cu o creștere ridicată dacă există capital pentru formarea nucleelor eterogene. În acest caz formarea nucleelor este inițiată de apariția unor particule străine. Acestea pot fi de multe tipuri dar în mod frecvent este un polimer cu o densitate similară de energie de coeziune ce este cristalizat dar prezintă un punct de topire mai mare. Agenții de formare a nucleelor sunt acum utilizați pe scară largă în produsele comerciale. Acestea au efectul uzual de a promova o înghețare rapidă a materialului oferind un grad ridicat de cristalizare, o claritate bună, controlul suprafeței și reducerea formării de goluri care pot apărea în cazul structurilor morfologice mari. Dacă un polimer elastic cu o structură regulată este întins, segmentele lanțului molecular vor fi aliniate și cristalizarea este determinată de orientare. Cristalizarea cauzează o rigiditate pronunțată în material privind alungirea. Structurile cristaline sunt metastabile iar la retragerea forțelor acestea dispar. De regulă se constată că fibrele cristaline orientate sunt mai puternice decât cele neorientate. [Blythe, 2005]

Cercetări în cazul cristalizării materialelor polimerice s-au efectuat pentru: cristalizarea non-izotermală, cristalizarea în amestec, cristalizarea datorită solventului și presiunii utilizate, cristalizarea datorită curgerii, cristalizarea datorată orientării topiturii sau solventului, cristalizarea copolimerilor, epitaxială etc

*Polimerii pe bază de cristale lichide* sunt o clasă de materiale plastice poliesterice. Acestea nu sunt reactive, sunt inerte și au o rezistență ridicată la foc. Dintre cele mai cunoscute materiale LCP din comerț amintim Kevlar. *Polimerii cu cristal lichid (LCP)* se deosebesc față de alți polimeri semicristalini datorită structurii lor moleculare în faza de topitură. În cazul LCP lungimea lanțurilor au o structură extrem de ordonată, extinsă pe lungime și prezintă continuitate atât în stare lichidă cât și în cea solidă. [Iclănzan, 2006]

La masă molară mică polimerii liniari amorfi vor fi solizi ca stare de agregare la o temperatură mai mică decât temperatura la care aceștia sunt în stare lichidă.

Pentru fiecare polimer există un punct de topire bine determinat, punct la care moleculele au o energie suficientă de a se deplasa independent unele de altele obținându-se astfel condiția de curgere vâscoasă. Sub această temperatură moleculele nu au energia suficientă pentru a forma starea de curgere, întreaga masă comportându-se ca un solid rigid. La o temperatură mai mare decât a punctului de topire vom constata că materialul se distruge ceea ce înseamnă că s-a atins temperatura de descompunere. În cazul polimerilor cu masă molară ridicată punctul de topire nu mai este clar definit deoarece aici găsim o zonă intermediară de elasticitate. În acest caz sunt observate două temperaturi de tranziție: una de tranziție rigid solid-elastică ce este cunoscută ca temperatura de tranziție vitrosă iar cea de-a doua o temperatură de tranziție lichid-elastică nedefinită care este cunoscută ca și temperatura de curgere. În primul caz materialul prezintă o stare sticloasă în care mișcarea moleculelor este limitată. După trecerea de la această stare de tranziție vitrosă moleculele încep să se miște cu o anumită energie până când se atinge pragul de mișcare moleculară cooperativă ceea ce duce la formarea curgerii. [Rosato, 2000]

În cazul injectării, extrudării sau calandrării forfecarea topiturii în timpul curgerii va determina orientarea moleculară. În cazul injectării se preferă un ciclu de injectare rapid și matrița să fie încălzită la o anumită temperatură pentru reducerea unor molecule de material solidificate la începutul procesului.

## **2.2. Caracteristici ale curgerii topiturii materialelor polimerice în matriță.**

În procesele de prelucrare a materialelor termoplastice în special în prelucrarea prin injectare au loc deformații însoțite de modificări structurale și de variația proprietăților reologice.

Comportarea reologică a fluidelor reale și deci și a materialelor termoplastice se prezintă în reograme care redau dependența dintre efortul unitar de forfecare și reopanta  $\dot{\gamma}$  (gradientul de viteză). Aceste reograme se obțin din experimente de forfecare simplă a fluidelor. Curbele  $\dot{\gamma} = f(\tau)$  se numesc și *curbe de fluiditate*.

Pornind de la aceste curbe se poate calcula vâscozitatea în fiecare punct al curbei.

Complexitatea și varietatea comportării reologice a materialelor termoplastice poate fi intuită prin considerarea multiplilor factori ce o influențează. Printre cei mai importanți sunt: temperatura, scara timpului de deformare, masa moleculară și distribuția masei moleculare, structura monomerului și polimerului, absorbția de apă etc.

Vâscozitatea topiturii de polimer este influențată la procesare de un număr mare de factori printre care cei mai importanți sunt: temperatura de injectare a materialului, temperatura matriței, presiunea de injectare, presiunea de menținere; geometria digului, geometria piesei, configurația granulelor etc.

Topiturile de polimer se comportă newtonian dacă masa lor moleculară depășește 5000. Creșterea masei molare determină o creștere a vâscozității, din cauză că energia de activare se mărește odată cu creșterea masei elementelor ce iau parte la curgere. Când masa moleculară a atins o anumită valoare, lanțul macromoleculii se încălzește și elementele de curgere rămân de lungime aproximativ constantă. Aceasta rezultă din faptul că o creștere în continuare a masei moleculare nu mai modifică energia de activare a curgerii. [Șereș, 1996]

La mase moleculare egale, polimerii ramificați au vâscozitatea mai mică decât polimerii liniari, deoarece o macromoleculă filiformă se va putea găsi simultan în straturi cu viteze diferite. Vâscozitatea depinde de viteza de forfecare (reopantă) în funcție și de distribuția masei moleculare a polimerului. O distribuție îngustă a maselor moleculare înseamnă molecule cu dimensiuni apropiate, iar o distribuție largă înseamnă că lungimile moleculelor variază între limite mai largi.

Vâscozitatea topiturilor depinde și de temperatură, cu importanță mare asupra proprietăților tehnologice ale polimerului, deoarece sensibilitatea vâscozității la temperatură determină nu numai alegerea regimului de prelucrare ci și calitatea produselor obținute.

Odată cu creșterea temperaturii apare posibilitatea trecerii macromoleculii dintr-o stare de echilibru în alta, datorită energiei de activare. Ca urmare dependența vâscozității față de temperatură se poate exprima printr-o ecuație exponențială (ecuația lui Arrhenius) [Harper, 2000] în funcție de energia de activare a curgerii vâscoase:

$$\eta = Ae^{\frac{E}{RT}}, \quad (2.1)$$

unde:

- A – termen de frecvență;
- R – constanta gazelor;
- T – temperatura;
- E – energia de activare.

Odată cu creșterea presiunii, se micșorează distanțele intermoleculare, se măresc forțele de atracție dintre molecule și în consecință, vâscozitatea crește. În condițiile de lucru specifice prelucrării prin injectare, vâscozitățile materialelor termoplastice cresc. Funcția vâscozitate-presiune este o funcție exponențială.

Variația vâscozității în funcție de temperatură depinde și de structura polimerului, datorită configurației diferite a elementelor de curgere pentru fiecare polimer în parte. [Șereș, 1996] Comportarea reologică poate fi modificată prin adăugarea de materiale auxiliare. Solicitățile termomecanice ca număr și intensitate, afectează vâscozitatea topiturilor de materiale termoplastice. Odată cu mărirea numărului de prelucrări succesive, vâscozitatea aparentă (raportul dintre tensiune și viteza de deformare) crește. Vâscozitatea topitului sau curgerea se măsoară de regulă cu ajutorul unui plastometru de extrudare sau al unui reometru capilar sau cu plăci paralele. [Harper, 2000]

*Indicele de curgere* („melt index”) [Ryntz, 2003] este o mărime ce caracterizează comportarea la curgere a diferiților polimeri în stare topită. Determinarea se face pe aparate la o anumită presiune și temperatură, pentru cantitatea de material plastic care curge printr-un ajutoraj (capilar) într-un timp determinat (în general 10 minute).

În practică indicele de curgere  $I_C$  este utilizat ca bază pentru alegerea procedurii. Materialele cu același indice de curgere pot avea caracteristici de prelucrare diferite. În consecință  $I_C$  nu reprezintă un criteriu de comparație a prelucrabilității materialelor pulverulente. Indicele de curgere reprezintă o măsură inversă față de vâscozitate. Un indice de vâscozitate mare implică o vâscozitate scăzută iar un indice de vâscozitate mic implică o vâscozitate ridicată a materialului. [Rosato, 2001]

*Index-ul de polidispersie (PDI)*. [Sawhey, 2007], [Rosato, 1997], [Kaiser, 2006] Raportul dintre greutatea medie a masei molare și masa moleculară medie a oricărui polimer este numit indicele de polidispersie [Asua, 2007] sau gradul de polimerizare [Iclănzan, 2006] și se notează cu PDI.

$$PDI = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n} \quad (2.2)$$

unde,

$\bar{M}_w$  - este greutatea medie a masei molare, [Holmberg, 2002], [Smallman, 1999], [Harper, 2004]

$\bar{M}_n$  - este numărul masei moleculare medii, [Asua, 2007], [Sawhey, 2007]

$$\bar{M}_n = \frac{\sum NiMi}{\sum Ni} = \frac{N_1M_1 + N_2M_2 + \dots}{N_1 + N_2 + \dots} \quad (2.3)$$

unde:

$Ni$  - numărul de molecule ce au masa moleculară  $Mi$ ;

$N_1$  - moleculele ce au masa moleculară  $M_1$ ;

$N_2$  - moleculele ce au masa moleculară  $M_2$  și așa mai departe.

$$\bar{M}_w = \frac{\sum NiMi^2}{\sum NiMi} = \frac{N_1M_1^2 + N_2M_2^2 + \dots}{N_1 + M_1 + N_2M_2} \quad (2.4)$$

Greutatea medie a masei molare este întotdeauna mai mare decât masa moleculară medie a unui polimer. De exemplu dacă avem 100 de molecule cu o greutate moleculară de 100 și o moleculă cu o greutate moleculară de 10000 valoarea lui  $M_n$  este 200 iar a lui  $M_w$  este calculată la 5000. [Holmberg, 2002] Este evident faptul că dacă moleculele ar avea aceeași masă moleculară raportul  $M_w/M_n$  este totdeauna superior lui 1 putând ajunge la 10 sau chiar 20 în cazul anurilor polimeri liniari. Pentru exemplul dat anterior se obține o valoare de 25 a raportului respectiv acesta fiind totodată indicele gradului de polimerizare.

Curgerea fluidelor nonnewtoniene prin dispozitive cu secțiune inelară, plăci paralele, orificii circulare, are mare importanță pentru procedeul de prelucrare prin injectare. În cazul topiturilor de material termoplastic la prelucrarea prin injectare, poate fi întâlnită: curgerea laminară, curgerea turbulentă și curgerea în domeniul de tranziție de la laminar la turbulent.

Apariția curgerii turbulente sau a curgerii nestaționare, se datorește faptului că oscilațiile elastice ale mediului devin atât de intense încât nu mai pot fi amortizate de frecarea vâscoasă. Perturbația curgerii care duce la apariția curgerii nestaționare poate fi provocată de: perturbația profilului de viteze la intrarea într-o capilară sau un ajutoraj, lungimea capilarei sau ajutorajului, natura și rugozitatea suprafeței capilarei sau ajutorajului.

În procesul de curgere non-newtonian apare fenomenul de transfer de căldură, atât în curgerea laminară cât și în cea turbulentă. Transferul termic este preponderent convectiv, fiind influențat de curgere, iar curgerea depinde de comportarea reologică a topiturii. Ecuațiile de transfer de căldură prin convecție, depind de geometria spațiului de curgere, de condițiile limită, etc.

Curgerea în matriță este de regulă complicată datorită faptului că prin însăși construcția pereților acesteia se poate ajunge la ceea ce se numește solidificarea materialului polimeric topit înainte de umplerea completă a cavităților. Prin urmare proiectanții acordă o atenție deosebită modului de realizare al matriței și posibilității de umplere a acesteia decât proprietăților vâscozității topiturii. Materialele polimerice prezintă un factor al vâscozității intitulat, așa cum s-a prezentat anterior indicele de curgere al topiturii ( $\mu$ ) ce poate fi observat în figura 2.2 pentru câteva materiale polimerice. Datele prezentate în figură sunt limitate în sensul că acestea nu prezintă exact faptul că o cavitate se v-a umple sau nu în procesul de injectare. Umplerea depinde în mare măsură de grosimea pereților matriței de distanțele de curgere recomandate precum și de temperatura matriței și parametrii de topire ai materialului. Unul dintre acești parametri utilizați frecvent în reologie este rația frontului de curgere, care reprezintă viteza cu care topitura de material curge pe o anumită distanță pentru o anumită grosime/secțiune de perete.

În tehnică sau în practică se presupune faptul că, cu cât viteza de curgere a materialului/grosimea de perete este mai mare cu atât probabilitatea de umplere a cavităților matriței este mai ridicată. De regulă în procesul de injectare pereții pieselor ce se doresc a se obține nu variază foarte mult, proiectarea fiind realizată pentru piese cu aceeași grosime de perete. În cazul unor matrițe particulare în care se găsesc piese cu pereți variabili, proiectanții de matrițe și matrițerii merg pe ideea

utilizării unei viteze maxime a frontului de curgere în matriță prin mărirea temperaturilor de procesare sau a presiunilor din procesul injectării.

În ANEXA 2.1 se prezintă o serie de valori colectate pentru diverse materiale polimerice privind rația frontului de curgere. Între indexul de curgere al materialului și viteza frontului de curgere există o corelare inversă, astfel la o valoare scăzută a indexului îi corespunde o valoare ridicată pentru viteza frontului de curgere.

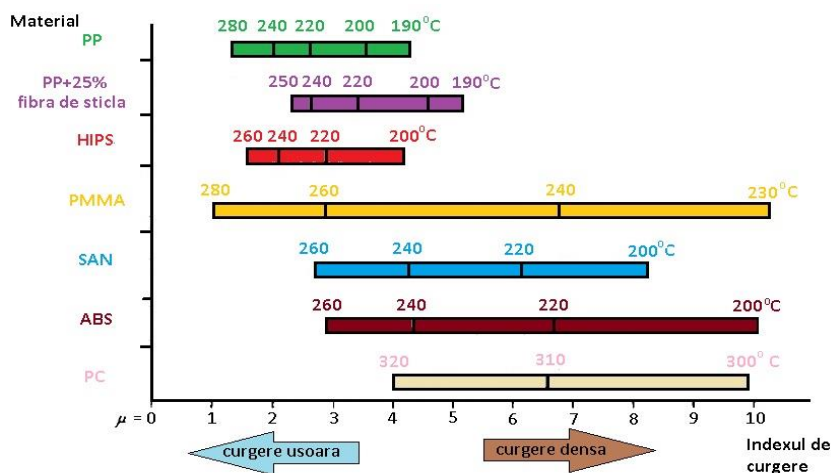


Fig.2.2. Indicele de curgere pentru câteva materiale plastice [Brydson, 1999]

Masa moleculară și distribuția masei moleculare sunt alți parametri importanți pentru curgerea unui material purverulent. Reacția de polimerizare este complicată aceasta nefiind realizată doar cu ajutorul unei singure/simple molecule.[Brydson, 1999]

Un alt parametru important în curgerea materialelor polimerice îl reprezintă absorbția de apă. Înainte de procesare materialele purverulente sub formă de granule sunt supuse unui proces de uscarea astfel încât să se elimine posibilele picături de apă formate între acestea și să nu existe probleme în obținerea pieselor dorite. O absorbție mare de apă a polimerului determină ca acesta să prezinte proprietăți de curgere ineficiente datorită aglomerării particulelor.[Harper, 2000]

## 2.3. Modificări de structură a polimerilor la procesarea prin injectare.

### 2.3.1. Condițiile termodinamice specifice injectării în matriță.

Substanțele în natură se prezintă în patru stări de agregare: solidă, lichidă, gazoasă și plasmă. Compușii macromoleculari există numai în stările de agregare condensate, solidă și lichidă.

Polimerii pot exista într-o diversitate de stări, aceștia pot fi rășini amorfe, elastici sau lichizi sau pot fi cu structură cristalină. Structura cristalină și moleculară poate fi orientată monoaxial sau biaxial. Amestecurile eterogene de polimeri în stări diverse de agregare permit ca materialele să fie produse cu proprietăți combinate care nu sunt specifice unui singur polimer.

Pentru caracterizarea proprietăților compușilor macromoleculari starea de agregare este neconcludentă și de aceea se definește *stare de fază*, care în sens termodinamic, reprezintă o porțiune dintr-un sistem, omogenă din punct de vedere al compoziției chimice și proprietăților, separată de restul sistemului prin suprafețe nete. Se deosebesc două stări de fază ale polimerilor: cristalină și amorfă.

Starea de *fază cristalină* se caracterizează prin aranjarea pachetelor de macromolecule flexibile în forme regulate formând rețele spațiale. Pachetul care cristalizează posedă limite de separație și tensiune superficială, însușiri caracteristice substanțelor cristaline. Proprietățile fizice ale fazei cristaline se schimbă după direcția de orientare, ele fiind anizotrope.

Starea de *fază amorfă* este opusul fazei cristaline implicând elemente structurale neordonate și fără simetrie.

La compușii macromoleculari în afara stărilor de agregare și de fază se definește și conceptul de *stare fizică*. Polimerii amorfi se prezintă în trei stări fizice: vâscoelastică, înalt elastică și vitroasă (sticloasă). Acestea se deosebesc între ele printr-o serie de proprietăți din modificarea cărora se determină temperaturile de transformare dintr-o stare în alta, cât și dependența lor de structură și proprietățile polimerului.

Starea *vitroasă* este caracterizată de deformații elastice foarte mici care cresc liniar cu temperatura respectând legea lui Hooke și se explică prin preponderența însemnată a forțelor inter- și intramoleculare asupra energiei de agitație termică. Această stare se menține până la temperatura de vitrifiere  $T_V$ . Temperatura de vitrifiere scade cu micșorarea masei moleculare.

Starea *înalt-elastică* începe deasupra temperaturii de vitrifiere. Pe intervalul corespunzător stării înalt elastice deformațiile cresc rapid la început, după care rămân constante până la temperatura de curgere  $T_C$ . În acest domeniu polimerul dezvoltă deformații mari, reversibile, datorate mișcărilor termice executate de segmentul de lanț, fără ca moleculele să se deplaseze independent.

Starea *vâscoelastică* începe în cazul polimerilor amorfi la temperatura  $T_C$ . Acest domeniu se caracterizează printr-o mișcare termică intensă a segmentelor de lanț și a macromoleculelor în întregime. Temperatura de curgere marchează apariția, alături de deformația elastică reversibilă, a deformației ireversibile.

Temperatura de curgere nu reprezintă o valoare fixă ci un interval caracteristic pentru fiecare polimer în parte, în funcție de configurația polimerului, de factori cinetici (viteza de încălzire) și de durata aplicării sarcinii. La  $T_C$  energia cinetică a macromoleculelor învinge forțele de coeziune moleculare, ceea ce permite mișcarea lor relativă de alunecare. Temperatura crește cu mărimea macromoleculelor.

Propusă de Gibbs și DiMarzio teoria termodinamică consideră că temperatura de tranziție vitroasă a unui polimer corespunde unei valori la care un lanț molecular dat prezintă o configurație unică. [Gnanou, 2008] Conform calculului de variație al entropiei unui lanț molecular în funcție de temperatură, temperatura de tranziție vitroasă este definită ca fiind temperatura la care entropia formată este egală cu zero.

Pentru rețelele de polimer entropia formată depinde în mare măsură de densitatea legăturilor intermoleculare. Forma pe care orice compoziție de polimer o va avea la orice temperatură dată depinde de următorii factori:

- ◇ temperatura de tranziție vitroasă;
- ◇ capacitatea de cristalizare a polimerului;
- ◇ punctul de cristalizare;
- ◇ orice orientare a moleculelor sau structurii cristaline care ar

putea fi indusă;

- ◇ tipul și gradul de reticulare (dacă există);
- ◇ indiferent dacă sunt sau nu polimerii în diferite stări de agregare

sau amestecați eterogen.

Dintre condițiile amintite anterior trebuie să definim temperaturile caracteristice care se găsesc la procesarea polimerilor și care sunt: temperatura de vitrifiere  $T_v$ , temperatura de curgere  $T_c$ , temperatura de fragilizare  $T_b$ , temperatura de topire  $T_t$ , temperatura de degradare termică  $T_d$ .

Astfel temperatura de fragilizare  $T_b$  este temperatura minimă până la care materialul nu este casant. Practic  $T_b$  este temperatura la care o epruvetă de polimer ce este supusă unei solicitări instantanee se rupe.

Temperatura de degradare termică  $T_d$  reprezintă temperatura la care începe descompunerea polimerului sub influența căldurii.  $T_d$  depinde de durata solicitării termice. Cu cât gradul de polimerizare este mai mare, cu atât stabilitatea termică a polimerului este mai mică.

Tranziția suferită de o regiune amorfă, neordonată a unui polimer de la starea sticloasă la o stare de cauciuc poartă denumirea de temperatură de tranziție vitroasă și se notează în literatura de specialitate cu  $T_g$ . [Koshal, 1993], [Harper, 2000], [Kosha, 1993], [Smallman, 1999] Temperatura de tranziție vitroasă poate fi afectată de către parametrii structurali cum sunt: masa molară, structura moleculară a polimerului, plastifiantii care sunt utilizați etc. [Gnanou, 2008] Conform altori autori temperatura de tranziție vitroasă se definește ca fiind temperatura sub care materialul polimeric se comportă ca sticla fiind rigid și puternic dar cu fragilitate ridicată. [Blythe, 2005]

Temperatura de topire  $T_t$  este caracteristică polimerilor cristalini și marchează trecerea de la starea cristalină solidă la starea lichidă.

Din analiza variației volumului specific al polimerilor cu temperatura se constată că polimerii cristalini au o temperatură de topire bine definită, iar polimerii semicristalini se caracterizează atât prin temperatura de topire cât și prin temperatura de vitrifiere. Polimerii numiți „cristalini” sunt de fapt semicristalini având un grad de cristalinitate mai mare de 90%.

Materialele polimerice prezintă caracteristici diferite atunci când sunt încălzite, caracteristici care depind de diverși factori cum sunt structura chimică a moleculelor polimerului și tipul de legături intermoleculare. Materialele polimerice sunt considerate materiale dure sau rezistente la temperatura camerei. În cazul materialelor polimerice, macromoleculele individuale se vor mișca destul de dificil motiv pentru care posedă forțe intermoleculare ceea ce le face să se deplaseze în grup/împreună. De obicei o creștere a temperaturii determină macromoleculele să se deplaseze cu o viteză și o intensitate mai mare. Dacă se depășește temperatura de tranziție vitroasă ( $T_g$ ) forțele intermoleculare ale polimerului devin atât de slabe că forțe externe pot provoca o desprindere/ruptură de lanț molecular. În acest interval de temperatură, materialul polimeric se găsește într-o stare de cauciuc elastic sau o stare termoelastică.

Dacă temperatura materialului continuă să crească se constată că forțele intermoleculare sunt aproape complet eliminate ceea ce face ca polimerul să treacă de la starea termoelastică la starea termoplastică sau de topitură. Această tranziție poartă denumirea de *temperatura de curgere* ( $T_c$ ) și valoarea exactă a acesteia nu poate fi specificată cu precizie pentru nici un material polimeric. Dacă încălzirea materialului polimeric continuă peste temperatura de descompunere sau degradare ( $T_d$ ), polimerul se distruge. [Șereș, 1996]



În contrast cu materiale termoplastice amorfe, există două condiții opuse în cazul materialelor termoplastice cristaline. Pe de o parte, există o zonă cristalină, în care moleculele sunt ambalate în strânsă legatură în –formație ordonată, respectiv zona amorfă caz în care moleculele sunt departe una de cealaltă, fiind dispersate într-o manieră dezordonată. Forțele intermoleculare care se găsesc în zona cristalină sunt considerabil mai puternice decât cele care se găsesc în zona amorfă. Conținutul amorf al polimerului se înmoaie peste temperatura de tranziție vitroasă ( $T_g$ ) [Ryntz, 2003], [Rosato, 2000] iar zona cristalină a topiturii de polimer în momentul în care se depășește temperatura de topire cristalină ( $T_m$ ). [Rosato, 2000][Ryntz, 2003]

În practică la temperatura camerei și peste aceasta cele mai multe materiale termoplastice semicristaline sunt atât dure cât și rezistente. Când temperatura de topire cristalină ( $T_m$ ) [Brent, 2006] este depășită, puterea materialului scade brusc și alungirea atinge cea mai mare valoare în intervalul termoeastic. Odată ce temperatura ridicată a eliminat complet forțele de coeziune în cadrul zonelor cristaline, alungirea scade brusc. Această diferență în caracteristicile de deformare ale materialelor termoplastice amorfe și semicristaline pot fi atribuite structurii moleculare diferite pe care acestea le au.

Injectarea materialelor termoplastice presupune: curgere, transfer termic și cunoașterea dependenței presiune-temperatură-volum pentru materialul purverulent prelucrat.

Starea termodinamică a unui material termoplastic în stare lichidă este definită de presiunea  $p$ , temperatura  $T$  și volumul specific  $V$ . Cele trei mărimi sunt interdependente. Interdependența acestor parametrii se exprimă printr-o ecuație de stare termodinamică, exprimată prin funcția:

$$F_{(p,V,T)} = 0. \quad (2.5)$$

Interdependențele  $p$ - $V$ - $T$  pot fi obținute empiric, semiempiric sau teoretic. Pe principiul generării unui grafic  $P$ - $V$ - $T$  al unui material polimeric se pot obține informații prețioase privind caracteristicile curgerii, informații pe care diverse programe specifice simulării curgerii în matriță le oferă.

Temperatura de topire  $T_m$  are loc în cazul materialelor cristaline, la un punct relativ ridicat, materialele amorfe neavând practic o temperatură de topire, curgerea acestora începe de regulă odată cu încălzirea materialului.

Temperatura de topire depinde de presiunea de injectare și de timpul de încălzire al materialului. Dacă temperatura de topire este prea mică se constată că vâscozitatea topiturii materialului va fi ridicată și vom avea nevoie de o presiune mare pentru umplerea în întregime a cavităților matriței. Dacă vâscozitatea este prea mare, este foarte probabil să apară fenomenul de degradare sau ardere ceea ce duce la obținerea de piese cu defecte. [Rosato, 2001] La procesarea materialelor polimerice în stare de topitură trebuie să luăm în considerare și absorbția de apă a materialului, forma fizică a granulelor, stabilitatea termică a polimerului, proprietățile de curgere ale topiturii, contracția și compresibilitatea, proprietățile termice care afectează răcirea și încălzirea materialului, caracteristicile legăturilor chimice și adeziunea topiturii la metal.[Koshal, 1993] Din cele prezentate anterior se constată că materialele polimerice posedă o serie de proprietăți termodinamice vitale pentru studiul curgerii topiturii de polimer în rețelele și cavitățile matriței.

O importanță deosebită se poate acorda oricărei temperaturi amintite anterior deoarece aceasta poate avea un efect nedorit în procesul de curgere. În cadrul procesului de injectare un aport deosebit îl reprezintă alegerea corespunzătoare a parametrilor de injectare precum și tipul de material ales pentru ca procesul de curgere în matriță să fie satisfăcător.



### **2.3.2. Relaxarea și ruperea lanțului molecular al polimerilor.**

Dacă un polimer este tensionat sau este supus diverselor solicitări de alungire, tensiunile interne tind să alinieze moleculele în direcția de alungire iar orientarea se poate determina prin metode optice.[ Blythe,2005]

De asemenea dacă alungirea continuă peste limita modulului de elasticitate al materialului se constată că se produce o scindare la nivelul lanțului molecular

*Dinamica lanțurilor moleculare în topitura de polimer.* Deasupra temperaturii de tranziție vitroasă în cazul polimerilor amorfi sau peste temperatura de topire în cazul polimerilor semicristalini, polimerii se topesc și pot astfel să curgă. Lanțurile moleculare au tendința să se relaxeze atunci când sunt supuse la o întindere de scurtă durată sau la un efort de forfecare:

✓ Relaxarea și revenirea la starea inițială sunt doar pentru scurt timp și implică o deformare complet reversibilă,

✓ Pe de altă parte dacă efortul aplicat în timp este suficient de mare se constată o revenire parțială la starea inițială datorată relaxării sistemului și a curgerii simultane.

Topitura de polimer adoptă pentru un timp foarte scurt un comportament sticlos urmat de un comportament de cauciuc, iar pe termen lung se adoptă un comportament de lichid vâscos motiv pentru care polimerii sunt considerați lichide vâscoelastice. Două proprietăți caracteristice topiturilor de polimer sunt:

- Ca și omologii în soluție topiturile de polimer sunt capabile să se deplaseze în totalitate după mișcarea browniană, iar în stare solidă lanțurile de polimer nu se pot deplasa decât limitat intermolecular;

- Dincolo de o masă critică molară/moleculară ( $M_c$ ) lanțurile moleculare tind să se încălzească în topitură cum o fac și în stare solidă.

*Conceptul de rețea încălțită/încălcire a firelor.* Diluat într-un solvent bun lanțurile de polimer tind să se umfle și conform teoriei lui Flory rădăcina pătrată medie a distanței de la un capăt la celălalt variază cu  $3/5$  din masa lor molară. Într-un solvent slab, legăturile au tendința de a contracta și de a nu se încurca, caz în care distanța de la începutul la sfârșitul legăturii variază cu  $M^{1/3}$ .

Interacțiunile care contribuie la încurcarea lanțurilor de polimer pot juca un rol semnificativ comparabil cu cel fizic al legăturilor între catene în sensul că încurcarea a două lanțuri moleculare este interdependentă. Comparația între încălcire și legătura între catene într-o rețea de polimer se oprește aici deoarece spre deosebire de lanțurile reticulare, lanțurile încălcite nu formează o macromoleculă infinită singulară dar poate aluneca una peste cealaltă declanșând fenomenul de curgere. Aceasta afectează, în schimb comportamentul fizic al topiturii de polimer.

*Bazele/teorii moleculare ale detensionării și alungirii.* Deoarece cauzele exacte la detensionarea sau alungirea moleculelor de material polimeric sunt diverse, ele pot fi grupate în cinci categorii generale:

a) scindarea/ ruperea lanțului molecular care se datorează în special unei degradări oxidice sau hidrolizei. În mod contrar aceasta cauzează o creștere în lungime în cazul alungirii.

b) interschimbabilitatea legăturilor/valențelor. Acest fapt nu reprezintă o degradare, în sensul că greutatea moleculară descrește astfel încât se pot crea legături diverse în lanțul molecular între molecule partenere diferite.

c) curgerea vâscoasă este cauzată de lanțuri liniare de polimer care alunecă

unul peste altul mecanismul fiind responsabil pentru o curgere vâscoasă în conducte și o curgere turbulentă sub presiune/efort.

d) relaxarea/detensionarea Thirion reprezintă o relaxare reversibilă a legăturilor fizice dintre catene sau care se găsesc prinse în rețele cu o anumită elasticitate. De obicei, o rețea care prezintă elasticitate va avea o relaxare de aproximativ 5% prin acest mecanism de cele mai multe ori în câteva secunde. Trebuie subliniat faptul că lanțurile moleculare sau chiar legăturile sunt în continuă mișcare.

e) detensionarea moleculară în special în apropierea lui  $T_g$  temperaturii de tranziție vitroase. În apropierea lui  $T_g$  lanțurile moleculare sunt detensionate sau se relaxează cu un ritm aproximativ egal cu intervalul de timp al experimentului. În cazul în care lanțurile moleculare se găsesc sub tensiune în timpul experimentului mișcările moleculare vor avea tendința de a diminua tensiunile.

Ruperea lanțurilor moleculare la procesare în cazul polimerilor, pot fi determinați de diferiți factori. Prin urmare dacă în matriță se găsește apă se constată că piesa injectată va avea defecte de genul golurilor sau umflăturilor pe piesă. Aceste defecte privesc la nivel molecular au ca rezultat o extindere a lanțurilor în jurul obstacolului întâlnit și o desprindere a acestora una față de cealaltă.

Liniile de sudură care sunt observate pe diverse piese prezintă aceeași problemă la nivel molecular. În porțiunea de piesă în care liniile de sudură sunt clar vizibile este posibil ca lanțurile moleculare să fie slab intercalate sau chiar deloc, o solicitare cât de mică a piesei în această porțiune ducând la ruperea acesteia.

## **2.4. Factorii care pot influența modificările de structură a polimerilor în procesul injectării.**

Printre cei mai importanți factori ce pot influența structura polimerilor la procesare amintim: temperatura, scara timpului de deformare, masa moleculară și distribuția masei moleculare, structura monomerului și polimerului etc. Principalii factori care pot să influențeze prelucrarea prin topire a materialelor termoplastice în cadrul procesului de injectare sunt: comportarea higroscopică a compusului polimeric, caracteristicile granulelor, proprietăți termice care influențează topitura polimerului, stabilitatea termică, proprietățile de curgere, proprietăți termice care afectează răcirea polimerului, cristalizarea, orientarea topiturii etc.

*Comportamentul higroscopic.* Este esențial ca în compoziția polimerului să nu existe urme de apă sau solvenți cu punct de fierbere scăzut. Un volum mic de apă sau particule mici pot genera aburi care vor tinde să se blocheze între legăturile compusului în timpul etapei de prelucrare. Acest fapt va avea o influență negativă asupra produsului finit deoarece acesta va conține goluri de aer. Aceste goluri de aer sunt uneori aplatizate prin intermediul curgerii polimerului datorită forfecării dar conduc la suprafețe ale piesei ce prezintă mici șanțulețe/retasuri. Uneori, apa poate fi prezentă doar pe suprafața compusului și se îndepărtează ușor. În alte cazuri, apa poate fi absorbită de către polimer și e nevoie de perioade lungi de uscare a pieselor injectate. În general cu cât temperatura de procesare este mai mare cu atât este mai mic nivelul de apă tolerat în compus, deoarece temperaturile ridicate vor genera volume mai mari de abur cu o masă de apă fixă. [Brydson, 1999]

De exemplu în cazul în care se prelucrează la aproximativ 300°C policarbonații, conținutul de apă admis ar trebui să fie mai mic de 0,02%, în timp ce acetatul de celuloză admite un conținut de până la 0,3% în cazul procesării la 170°C. Compușii de bază ai polimerilor care nu sunt ei înșiși higroscopici pot uneori cauza probleme datorită aditivilor higroscopici.

*Caracteristicile granulelor.* Într-un timp era un lucru comun ca extrudarea și injectarea granulelor din material polimeric să aibă mărimi și forme diferite care s-au obținut prin spargerea sau zdrobirea unor piese rebut sau a rețelelor până la foaie între lamele rotative sau staționare a mașinilor de tăiat sau granulat. Mai nou s-a descoperit că utilizarea unor granule de formă regulată și chiar de mai multe dimensiuni sau de aceeași dimensiune pot duce la rate de transfer mult mai mari în cilindrul de injectare, încălzirea materialului și controlul realizându-se mult mai bine ceea ce a dus la o simplificare majoră în ceea ce privește proprietățile de curgere.

Granulele sunt în prezent obținute fie prin tăiere, fie prin zdrobire folosind mașini de granulat speciale sau prin extrudare specifice care sunt apoi tăiate la rece sub formă de "spaghete" sau granule tăiate transversal sau tăiate la cald pentru a da granulelor o formă elipsoidală.[Brydson, 1999]

*Proprietăți termice care influențează topitura polimerului.* Compușii polimerici pot varia considerabil în funcție de cantitatea de căldură necesară pentru a-i aduce la temperaturi de procesare. Aceste diferențe între materiale nu apar ca urmare a temperaturilor de prelucrare diferite, ele pot apărea datorită căldurii specifice.

Polimerii cristalini au în plus o căldură latentă de topire a structurii cristaline care trebuie să fie luată în considerare în cazul procesării. Căldura pentru topitură poate fi generată și extern caz în care distanțele de transfer de căldură ar trebui să fie reduse la minim și distribuția de temperatură va depinde de conductivitatea termică, sau intern, fie printr-o frecvență înaltă a procesului de încălzire sau de către lucru mecanic. Încălzirea de înaltă frecvență este rareori aplicabilă pentru a topi materialul polimeric dar căldura de prelucrare prin frecare obținută datorită lucrului mecanic poate oferi o contribuție semnificativă. Cantitatea de căldură generată de frecare crește odată cu rata de lucru și cu vâscozitatea polimerului.

Având în vedere faptul că vâscozitatea topiturii scade cu creșterea temperaturii, rata de frecare la intrare scade cu creșterea temperaturii odată ce polimerul este în stare topită.

*Stabilitatea termică.* Materialele polimerice sunt de obicei diferite din punctul de vedere al stabilității termice care reprezintă o proprietate de care trebuie să se țină cont în momentul în care se dorește lucrul cu material topit. Întrebările la care ar trebui să se răspundă privind stabilitatea termică a unui material polimeric sunt:

- Cât de stabil este acesta la temperaturi ridicate în absența oxigenului și pentru cât timp poate fi încălzit la o temperatură de procesare specifică?
- Cât de stabil este acesta la o temperatură ridicată în prezența oxigenului?
- Dacă produsul este instabil cum sunt afectate proprietățile polimerului?
- Dacă există ce produse degradate sunt eliminate?
- Degradarea materialului este condiționată de unul dintre metale ce poate fi prezent în procesul de injectare?
- Degradarea materialului este condiționată de alte materiale cu care polimerul poate intra în contact?[Brydson, 1999]

Unele materiale polimerice sunt capabile să reziste destul de mult unei solicitări termice în timp, termen utilizat pentru a descrie atât intensitatea (temperatura) cât și durata de încălzire. Polietilena și polistirenul pot fi reprocessate de mai multe ori iar singurul dezavantaj îl reprezintă o decolorare ușoară a materialului iar în cazul polietilenei o deteriorare în ceea ce privește proprietățile electrice de izolator. Alți polimeri pot să prezinte mai multe tipuri de probleme. Un exemplu este PVC-ul care necesită încorporarea de stabilizatori în procesare și chiar și așa materialul se poate decolora și emana acid clorhidric care are efect coroziv asupra multor metale. În același timp, unele metale au efect catalitic în combinație

cu acest polimer, astfel încât trebuie să se țină cont de părțile metalice care vin în contact direct cu polimerul.

O serie de polimeri, cum ar fi poliactalul sau PMMA se depolimerizează de monomer în timpul încălzirii. La temperaturi de procesare o serie de monomeri se gasesc în fază gazoasă și chiar și atunci când nu există decât o mică cantitate de depolimerizare se pot forma în produs un număr mare de bule.

*Proprietăți de curgere.* Proprietățile de curgere ale topiturii de polimer sunt complexe. Acest lucru este valabil dacă se încearcă deformarea unor lanțuri moleculare lungi încălcite diferit ce prezintă o anumită masă moleculară. În timpul curgerii materialului polimeric forțele care acționează asupra moleculelor de material determină o desfășurare sau o rostogolire a acestora în drumul topiturii spre cavitata matriței. Dacă forțele impuse asupra topiturii de material vor înceta se constată că moleculele în drumul lor au tendința de a se redesfășura. Aditivii utilizați în proces pot influența de asemenea curgerea materialului polimeric. De asemenea elemente care pot influența curgerea sunt viteza de forfecare, efortul unitar de forfecare și coeficientul vâscozității la forfecare.

Proprietățile tensiunii în cazul vâscozității la o viteză de forfecare este determinată de către doi factori volumul liber din interiorul masei de topitură de polimer și modul de încălcire al lanțurilor moleculare. Creșterea temperaturii la o presiune constantă poate cauza o scădere a vâscozității iar o creștere a presiunii la o temperatură constantă determină o creștere a vâscozității ceea ce cauzează o descreștere în volum. Dacă temperatura și presiunea prezintă importanță asupra schimbării vâscozității topiturii de material mai putem aminti că și masa moleculară influențează vâscozitatea. Dacă topitura de polimer este deformată moleculele materialului nu doar alunecă unele peste celelalte dar au chiar tendința de a se uni datorită configurației desfășurate pe care o prezintă. În termeni reologici se poate spune că topitura de polimer prezintă elasticitate. Efectele de elasticitate ale moleculelor prezintă o importanță deosebită în injectarea materialelor polimerice. Deformațiile vâscoase la o forță de deformare fixă cresc rapid cu creșterea temperaturii cu toate că deformațiile elastice se modifică mai greu. Acesta este motivul pentru care componenta deformației elastice are tendința să fie importantă la o temperatură de prelucrare joasă decât la o temperatură de prelucrare ridicată. De asemenea deformația vâscoasă este dependentă de masa moleculară caz în care odată cu creșterea masei moleculare vâscozitatea crește, rata de deformare a vâscozității scade și crește proporția de deformare odată cu derularea lanțurilor. Prin urmare materialele cu o masă moleculară ridicată tind să aibă efecte de elasticitate mai importante decât materialele cu masă moleculară scăzută.

*Proprietăți termice afectate de răcire.* Răcirea matriței reprezintă un element important privind forma pieselor rezultate în urma injectării. Răcirea poate să afecteze procesul de injectare în două direcții fiind un factor care influențează rata de producție sau influențează proprietățile produsului. Rata de producție a pieselor este pusă în evidență în procesul de injectare prin premisa că, cu cât solidificarea materialului durează mai mult cu atât ciclul de injectare va fi mai mare. Timpul de solidificare pentru polimerii amorfi se determină de către diferența dintre temperatura de injectare a topiturii în matriță ( $T_i$ ) și temperatura matriței, temperatura de tranziție vitrosă și nivelul mediu al căldurii specifice a materialului.

În cazul polimerilor cristalini timpul de solidificare va fi determinat de către valoarea lui  $T_i - T_c$ , punctul de cristalinitate al materialului, de căldura latentă de fuziune a structurilor cristaline și de căldura specifică peste limita  $T_i - T_m$ . Rata de răcire poate afecta direct proprietățile estetice ale produsului injectat în sensul că la o răcire prea bruscă a materialului apare fenomenul de solidificare prematură ceea

ce duce la piese incomplete. Răcirea poate afecta rata de cristalinitate a materialelor prin faptul că un material cu o structură cristalină grosolană v-a avea proprietăți diferite de materialul cu structuri cristaline mici. Procesul de răcire determină în mare măsură modul de contracție al piesei injectate. În cazul unei răciri rapide a piesei injectate se constată defecte de genul golurilor de aer datorită unei contracții necorespunzătoare sau o strângere sau deformație a materialului ceea ce duce la o piesă cu defecte.

*Cristalizarea.* Cristalizarea are o influență majoră asupra aranjării și comprimării moleculelor din topitură. O împachetare eficientă crește forța de atracție intermoleculară ceea ce duce la o creștere sau intensificare a proprietăților mecanice ale materialului. Modul de aranjare și împachetare al moleculelor are o influență sporită asupra proprietăților mecanice ale materialului dar și asupra contracției acestuia. De asemenea răcirea matriței influențează fenomenul de cristalizare al materialului. Se spune că dacă fabricantul dorește să controleze produsele realizate trebuie mai întâi să controleze procesul de manufacturare.

*Orientarea și contracția.* În timpul curgerii topitului de polimer moleculele au o anumită orientare în frontul de curgere iar sub acțiunea forțelor reologice care apar la răcirea piesei se desfășoară procesul de contracție al acestora.

După cum s-a declarat anterior orientarea moleculară se produce în timpul prelucrării polimerilor prin topire. Dacă sunt eliminate tensiunile de deformare, moleculele încep să se deplaseze din nou, dar procesul nu poate fi în echilibru înainte ca polimerul să se răcească sub temperatura de tranziție vitrosă-Tg. Acest fapt poate duce la orientare reziduală în cazul unor piese injectate și se constată faptul că în anumite direcții de curgere materialul prezintă o rezistență mai mare de patru-cinci ori decât în altă direcție. Acest lucru poate duce la apariția unor plane de lucru slabe în piesă și aceasta poate să se rupă ușor dacă este supusă la șoc. În general, un astfel de tip de orientare nu este de dorit dar există cel puțin două cazuri în care o astfel de orientare se aplică practic:

(1) construcția de tip balama sau articulație care s-a dovedit a fi un succes deosebit cu polipropilenă în care moleculele sunt congelate în orientare la un unghi drept față de axa articulației. [Brydson, 1999]

(2) banda fibrilată care reprezintă un succes deosebit cu polipropilenă, în care pelicula de film este orientată atât de mult încât apare întinderea/fibrilația.

În general, se poate spune că răcirea și înghețarea macromoleculelor de polimer în orientarea topitului va depinde de:

(a) orientarea inițială funcție de viteza de forfecare,  
(b) răcirea topitului de polimer sau timpul de detensionare al moleculelor între temperatura de prelucrare și temperatura de solidificare,

(c) timpul disponibil contracției și răcirii topitului materialului care depinde de valoarea timpului de procesare din care se elimină temperatura mediului ceea ce duce la ciclul de injectare.

A doua problemă care persistă la procesarea materialelor polimerice este aceea a contracției. În timpul proceselor de extrudare și injectare în matriță topitura de polimer este supusă unor presiuni hidrostatice extreme care au tendința de a provoca compresiune. De exemplu, la injectare aceasta se manifestă în momentul imediat următor procesului de umplere al matriței de către materialul topit. În cazul în care matrița a fost brusc deschisă în această etapă piesa injectată se va extinde puțin și poate să apară apoi contorsionată. Cu toate acestea în timpul răcirii matriței mișcarea moleculară devine tot mai slabă și presiunile exercitate asupra pereților matriței se diminuează.

În cazul polimerilor cristalini cu cât grupul de molecule este mai ordonat cu atât contracția este mai mare. Variațiile divese care apar în condițiile de injectare pot duce la contracții intense în piesă și trebuie să fie controlate cu o deosebită atenție. Principalii factori care pot determina o creștere a contracției sunt:

- o creștere a temperaturii matriței care permite un timp mai îndelungat pentru producerea cristalizării,
- o scădere a timpului de injectare,
- o descreștere a presiunii de injectare.

Contracția este adesea diferită în lungul liniilor de curgere și perpendicular pe acestea. De obicei se consideră că o creștere a temperaturii de topire reduce contracția în lungul curgerii dar crește contracția perpendicular pe frontul de curgere. Contracția volumetrică nu este afectată de temperatura de topire a materialului.[Brydson, 1999]

## **2.5. Rețele utilizate în procesul de injectare.**

### **2.5.1. Noțiuni privind rețelele de injectare.**

Rețelele de injectare sunt sisteme utilizate în cazul injectării în matrițele cu mai multe cuiburi și cu un singur cuib reprezentând elementul intermediar între duza mașinii de injectat și cuiburile matriței. [Campo, 2006], [PMD, 2001] La injectare topitura de material trece prin duza mașinii în duza matriței unde se umple culeea de unde materialul continuă să curgă prin canalele de distribuție și subrețele după care prin intermediul digului materialul ajunge la cavități. Ca regulă generală la injectare, rețelele de injectat trebuie să fie astfel concepute ca topitura omogenă de material să umple toate cavitățile matriței simultan și uniform la o presiune egală. [Fischer, 2003]

Rețelele de injectat de tipul celor reci sunt evacuate deodată cu piesele din matriță și cu culeea și prezintă dezavantajul că se produc o mulțime de rebuturi. În cazul canalelor de injectat izolate avantajul este acela că materialul rămâne fluid în centrul rețelei, piesele rebut fiind mai puține dar dezavantajul este că există o tendință frecventă de solidificare a materialului la intrarea în dig. Matrițele care se realizează cu canale încălzite prezintă avantajul că mențin topitura de material pe tot timpul procesului în starea de curgere, dezavantajul fiind posibilitatea solidificării digurilor la evacuarea pieselor din matriță. [Giboz, 2007]

### **2.5.2. Componenta rețelilor de injectat.**

O rețea de injectat este alcătuită de regulă din trei elemente componente. Aceste elemente ce compun rețeaua de injectat sunt prezentate în figura 2.3 ele fiind: culeea, canalele de distribuție respectiv diguri.

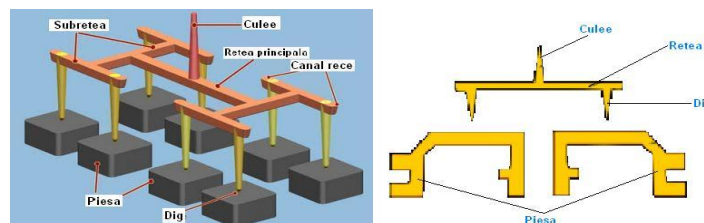


Fig.2.3. Alcătuirea unei rețele de injectat[Mould, 2008][Imold, 2011]

A) *Culeea*. Canalul central de injectare sau culeea se definește ca fiind canalul situat în placa fixă a matriței prin care un material plastic fluid/în stare topită este injectat prin duza mașinii de injectat în matriță. [Rosato, 2000], [Șereș, 1996]

Configurația geometrică a canalului central de injectare este de obicei sub forma unui con [PMD, 2001] a cărui pereți sunt lucioși având o rugozitate mică fiind parcă rectificați și lustruiți în vederea unei curgeri line/lente a materialului în matriță. Conicitatea culeei are o valoare cuprinsă între 3-5° și are rolul de a fi evacuată mai rapid și mai simplu din matriță. [Jones, 2008]

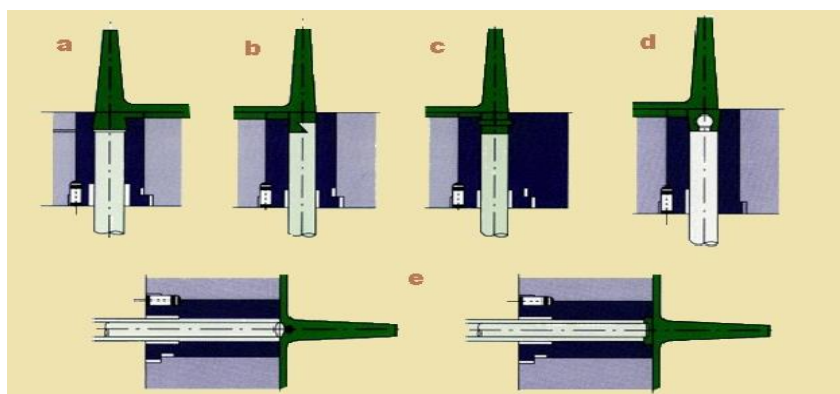


Fig. 2.4. Tipuri de extractoare de culee a-cu tija filetată, b-cu tijă de tip Z, c-cu tijă cu umăr, d-cu tijă cu cap sferic, e-alte tipuri. [Gava, 2001]

Culeea este evacuată din matriță împreună cu piesa sau familia de piese injectate cu ajutorul extractorului de culee. Din punct de vedere al geometriei extractoarele de culee pot avea configurații diferite [Campo, 2006], un exemplu în acest sens fiind evidențiat cu ajutorul figurii 2.4. [Cavalheiro 2004], [Gava, 2001]

Culeea, care face tranziția de la topitura fierbinte a materialului termoplastic la cavitatea rece a matriței, reprezintă o parte din lungimea de curgere a materialului polimeric și trebuie să aibă o asemenea dimensiune astfel încât presiunea de menținere să fie minimă și capacitatea acesteia de a livra material la extremitatea de ieșire să se realizeze fără probleme. [Rosato, 2000]

De regulă dimensiunea la ieșirea din culee nu ar trebui să fie mai mică decât diametrul canalului de distribuție la intersecția secțiunilor.

În cazul matrițelor cu o singură cavitate culeea intră de regulă, direct în cavitate, caz în care diametrul culeei la intrarea în cavitate trebuie să fie de două ori mai mare decât grosimea de perete a piesei. [Rosato, 2000]

Culeea prezintă destule probleme pentru diverse materiale polimerice datorită faptului că duza reprezintă un sistem de transfer de căldură ce trebuie să mențină topitura de material în starea fluidă iar culeea menține o temperatură conductivă a topiturii până la solidificarea acesteia.

Problemele cele mai dese care apar la injectarea materialelor termoplastice sunt degradarea materialului, o curgere neuniformă a topiturii și solidificarea materialului în duză. Acest tip de probleme sunt mult mai pronunțate dacă se utilizează la injectare materiale ce au o cristalinitate ridicată sau sunt sensibile la temperatură.

Pentru rezolvarea unor astfel de probleme inginerul este nevoit să reproiecteze culeea matriței prin minimalizarea lungimii și dimensiunilor acesteia sau prin utilizarea unui tip de culee (duză) încălzită.



B) *Canale de distribuție*. Canalele de distribuție sau rețelele de distribuție sunt sisteme prin care materialul topit curge de la culee înspre cavități în scopul umplerii acestora, prin intermediul digurilor. [Rosato, 2000], [Drobny, 2007]

În cazul dimensionării canalelor de distribuție se ține cont de o serie de factori care depind de:

- Configurația matriței;
- Mașina de injectat;
- Modalitatea de lucru;
- Materialul injectat.

Dimensionarea canalelor de injectat în funcție de configurația matriței se realizează ținând cont de geometria piesei injectate, calitatea impusă piesei, volumul și grosimea pereților acesteia. Dimensionarea canalelor în funcție de mașina de injectat are ca factori presiunea de injectare, frecvența injectărilor, tipul de închidere. Din punctul de vedere al modului de lucru se ține cont dacă se lucrează în ciclu automat sau semiautomat iar din punct de vedere al materialului injectat se ține cont de contracție, compoziția chimică a acestuia, vâscozitate etc.

Cavitățile matriței trebuie astfel proiectate încât lungimea canalelor de distribuție să fie cât mai mică, fără pierderi dacă este posibil iar umplerea tuturor cavităților să se realizeze echilibrat. Acest fapt înseamnă că rețeaua trebuie să fie identică pe ambele plăci de formare iar lungimile până la cavități să fie egale.

O importanță deosebită se acordă și geometriei canalelor de injectat. Secțiunea acestora poate fi diversă dar cele mai utilizate sunt cele rotunde, semirotonde, trapezoidale și trapezoidal modificat. [Rosato, 2000]

Rețelele cilindrice sunt cele mai eficiente din punctul de vedere al curgerii dar sunt și cele mai scumpe [Cavalheiro, 2004], deoarece acestea trebuie să fie prelucrate pe ambele plăci ale matriței.

Tipul de rețea semirotond necesită o presiune de menținere ridicată și un timp mai mare de răcire pentru solidificarea topiturii motiv pentru care acestea sunt rareori recomandate. Aceste tipuri de secțiuni s-au utilizat în trecut iar astăzi sunt rar utilizate. [Campo, 2006]

Rețelele trapezoidale sunt considerate a fi un compromis între cele rotunde și semirotonde iar rețelele trapezoidale modificate se deosebesc prin faptul că prezintă fundul rotunjit adică o secțiune parabolică. [Harper, 2000], [Cavalheiro, 2004]

Diametrul rețelei este determinat de obicei de grosimea de perete a piesei. Secțiunile trapezoidale sunt considerate a fi la fel de eficiente cu cele rotunde dacă se utilizează o conicitate pe verticală a marginilor trapezoidale cuprinsă între 5-15° (2..5° [PMD, 2001]). [Rosato, 2000] Rețelele sunt realizate de regulă pe partea mobilă a matriței și canalul nu necesită lustruire. [Cavalheiro, 2004]

O secțiune mică a rețelei de injectat necesită o presiune de injectare ridicată și un timp de umplere mare a cavităților matriței. Rețelele care au o secțiune mare au avantajul că reduc tensiunile interne din piesele injectate, liniile de sudură, liniile de curgere și oferă o acuratețe bună a suprafeței pieselor.

De regulă se preferă ca distanța de la duza mașinii de injectat la cavitățile matriței să fie cât mai scurtă posibil. Lungimile mari sunt luate în considerare doar în cazul în care matrița are multe cavități sau prezintă lungimi mari ale rețelelor de injectat datorate geometriei piesei. [Rosato, 2000]

În figura 2.5 sunt prezentate diverse tipuri de secțiuni geometrice reprezentative pentru canalele de distribuție și importanța acestora în procesul injectării.



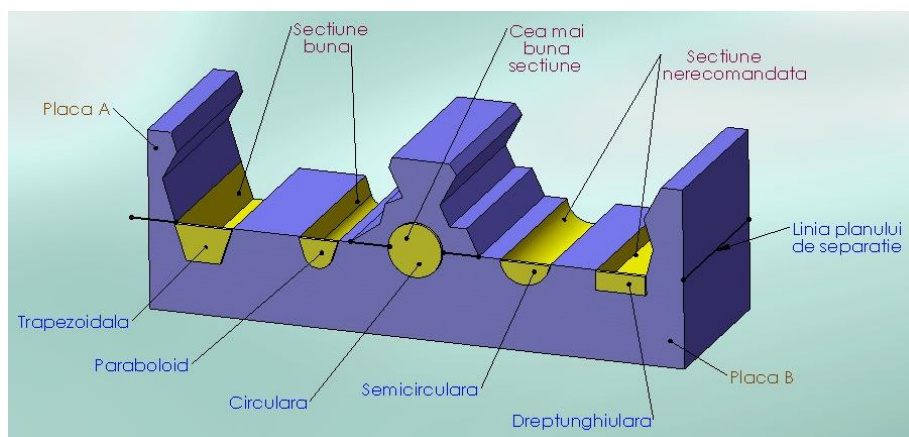


Fig 2.5. Secțiuni ale canalelor de distribuție

Conform figurii prezentate anterior canalele de distribuție pot să aibă următoarele secțiuni:

- Secțiune trapezoidală;
- Secțiune parabolică;
- Secțiune circulară;
- Secțiune nefavorabilă.

Secțiunea canalelor de distribuție se calculează cu ajutorul următoarelor formule matematice:

- Pentru secțiunea circulară:

$$D = S_{max} + 1,5 [mm]; \quad (2.6)$$

unde

D – diametrul secțiunii;

$S_{max}$  – grosimea maximă a peretelui piesei injectate.

- Secțiune parabolică:

$$D = S_{max} + 1,5 [mm] \quad (2.7)$$

$$L = 1,25 D [mm]; \quad (2.8)$$

L – lățimea canalului de distribuție;

- Secțiune trapezoidală;

$$L = 1,25 D [mm] \quad (2.9)$$

Determinarea secțiunii canalului prin această metodă oferă valori aproximative și nu exacte. Pentru o determinare mai exactă a secțiunii canalelor este necesar a se lua în considerare comportarea la curgere a materialului plastic în rețelele de distribuție. [Șereș, 1996]

În cazul diverselor aplicații, acolo unde matrița este utilizată un timp scurt canalele de distribuție sau rețelele se vor realiza direct pe pastila pe care se găsesc cavitățile matriței, prin procedeul de electroeroziune sau frezare.

Conceptul de diametru hidraulic ( $D_H$ ) se referă la rezistența la curgere a diferitelor secțiuni de canale de distribuție. Diametrul hidraulic se calculează dintr-o expresie aleasă pentru a da secțiunii circulare o valoare de  $1D$ , unde  $D$  reprezintă diametrul canalului de distribuție,  $A$  aria secțiunii de curgere iar  $P$  perimetrul.

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (2.10)$$

Valorile rezultate pentru diametrele hidraulice echivalente (fig. 2.6) demonstrează clar superioritatea secțiunii circulare pentru rețelele realizate în ambele plăci ale matriței și secțiunea parabolică pentru rețelele prelucrate pe o singură placă a matriței. [Drobny, 2007]

Secțiunea de curgere				
$D_H$	D	0.9523D	0.9116D	0.8862D
Secțiunea de curgere				
$D_H$	0.8771D	0.8642D	0.8356D	0.7090D

Fig. 2.6. Diametrele hidraulice echivalente pentru secțiuni uzuale de rețele [Drobny, 2007]

C) *Digul*. Digul reprezintă porțiunea îngustă, ce prezintă adâncime mică și care face legătura între canalul de distribuție sau subrețea și cuibul matriței. [Drobny, 2007] Există o diversitate de tipuri de diguri utilizate în cadrul injectării materialelor plastice specifice diverselor tipuri de piese sau matrițe acestea fiind prezentate într-un subcapitol viitor (vezi 2.6).

Este necesar ca digurile matrițelor să fie realizate de dimensiuni mici de la prima prelucrare, această dimensiune a lor putând fi mărită sau modificată la o prelucrare ulterioară. [Rosato, 2000]

Lungimile cele mai uzuale în cazul digurilor sunt cele cuprinse între dimensiunile 1...1,5mm. Dacă volumul de material injectat diferă în cazul cuiburilor unei matrițe dimensiunea digului unei cavități se poate calcula arbitrar astfel:

- Pentru diguri circulare,

$$d_2 = d_1 \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^{1/4} \quad (2.11)$$

- Pentru diguri rectangulare,

$$t_2 = t_1 \left( \frac{W_2}{W_1} \right)^{1/3} \quad (2.12)$$

unde,

$d_1$  -diametrul digului primei cavități, (in. sau cm )

$d_2$  -diametrul digului celei de-a doua cavități, (in. sau cm )

$t_1$  -adâncimea digului în prima cavitate, (in sau cm)

$t_2$  -adâncimea digului în a doua cavitate, (in sau cm)

$W_1$  -volumul piesei din prima cavitate, (oz sau grame)

$W_2$  -volumul piesei din a doua cavitate (oz sau grame)[Rosato, 2000]

Distribuitorile cu canale calde oferă o serie de tipuri de diguri încălzite pentru a ușura curgerea topiturii în matriță. Dintre acestea amintim: dig de tip valvă, dig termal, cu duză caldă și de tip standard.

Locația digului unei matrițe trebuie să fie ales cu multă atenție/responsabilitate mai ales în cazul matrițelor cu mai multe cuiburi, de alegerea acestuia depinzând construcția matriței. Locația digului se alege în așa mod încât curgerea materialului în matriță să se realizeze rapid și uniform. Digul trebuie să fie ales astfel încât aerul care se găsește în matriță să fie evacuat în timpul injectării prin canalele de ventilație. [Rosato, 2000] O regulă care se impune la injectare este alegerea locației digului pe partea cea mai groasă de perete a piesei precum și totodată pe o parte care să nu afecteze aspectul estetic al acesteia.

Tipul optim de dig ales, geometria, dimensiunile și locația acestuia sunt determinate de următorii factori: volumul de material injectat, vâscozitatea materialului și viteza de injectare, temperaturile de procesare ale matriței respectiv topiturii, rata de cristalinătate specifică solidificării materialului injectat, mărimea, complexitatea și grosimea de perete a piesei injectate, tipul procesului de injectare (manual, automat, semiautomat, cu două plăci, cu trei plăci etc), cerințele piesei injectate (planeitate, concentricitate, toleranță etc). [Campo, 2006]

### **2.5.3. Tipuri de rețele de injectat.**

Rețelele de injectat utilizate în vederea umplerii matrițelor cu mai multe cavități pot fi împărțite în rețele de injectat convenționale/standard; rețele de injectat radiale; rețele de injectat neechilibrate și rețele de injectat echilibrate.

Dacă rețeaua de injectat trebuie să distribuie topitura de polimer la fiecare din cavitățile matriței în același timp aceasta ar putea fi natural echilibrată sau artificial echilibrată. În cazul rețelelor de injectat ce sunt natural echilibrate distanța de la culee până la diguri este aceeași iar în cazul rețelelor artificial echilibrate acestea au aceeași presiune de menținere de la culee la toate digurile.

*Rețeaua de injectat convențională.* Acest tip de rețea de injectat se utilizează în producțiile de serie mare și masă principalul obiectiv fiind productivitatea rapidă și ridicată fără implicarea unor costuri de producție mari. De asemenea în acest caz se utilizează și rețele de tip radiale sau în formă de stea.

*Rețea de injectat improvizată/neecheilibrată.* Tipul rețelelor de injectare neechilibrate sunt utilizate atunci când piesele au o configurație mai complexă și nu pot fi injectate utilizând rețelele convenționale. [Harper, 2000]

Sistemele de rețele neechilibrate prezintă o serie de dezavantaje datorită unei umpleri inegale, umplerilor târzii sau răcirii individuale a cavităților ceea ce duce la diverse neajunsuri. Dintre acestea amintim:

- ❖ Umplere incompletă;
- ❖ Diferențe de proprietăți ale produselor;
- ❖ Constrații diverse ale pieselor ceea ce duce la nerespectarea cotelor impuse;
- ❖ Existența unor goluri în piesă;
- ❖ Bavuri;
- ❖ Inconsistență a materialului;
- ❖ Matriță neproductivă.

De regulă și rețelele convenționale fac parte din rețele de tip neechilibrat dar datorită încercărilor de simulare de curgere cu ajutorul calculatorului se alege un număr optim de cuiburi astfel încât să se obțină o rețea echilibrată.

Încercările realizate în cazul rețelelor neechilibrate de modificare a dimensiunilor calculate în vederea sau în scopul obținerii unei curgeri egale au arătat că acest lucru a fost insuficient, ceea ce a dus la eșec. Acest lucru s-a constatat cu frecvență la piese mici, la piesele cu pereți subțiri precum și la piese care au o lungime a canalelor de distribuție secundare (subrețelelor) cu mult mai mare decât lungimea canalelor de distribuție principale.

*Rețea de injectat echilibrată.* În acest caz materialul se distribuie în mod egal de la duză înspre cavități iar volumul de material și condițiile de injectare sunt aceleași. În figura 2.7 se prezintă o succesiune de tipuri de rețele de injectat dintre cele enunțate anterior.

Rețelele de injectare echilibrate de tip radial sau de tipul literei "H" sunt considerate a fi natural echilibrate. Echilibrarea naturală a acestora este datorată faptului că distanțele canalelor de distribuție asemenea sunt egale pe întregul design al rețelei ceea ce duce la o umplere proporțională și în același timp a cavităților matriței.

În cazul rețelelor reci echilibrarea acestora se realizează cu ajutorul distribuției frontului de curgere iar constatarea în urma experimentelor a fost că topitura de material nu v-a curge în procent de 100% în toată rețeaua matriței. În acest scop Tabelul 2.1 prezintă probabilitatea procentuală de curgere în rețeaua matriței care prezintă patru rețele secundare pentru 64 de cavități, distribuția de curgere fiind egală iar rețeaua echilibrată. [Campo, 2006]

Tabelul 2.1

<b>Elementele rețelei de injectat</b>	<b>Probabilitatea procentuală de umplere a canalului</b>
Culee	100%
Rețea principală	50%
Prima rețea secundară	25%
A II rețea secundară	12.5%
A III rețea secundară	6.25%
A IV rețea secundară	3.12%

Dacă se dorește obținerea unor piese injectate de o calitate ireproșabilă și o toleranță ridicată se recomandă o așezare uniformă a cavităților în matriță, așezare care să faciliteze o umplere echilibrată. Numărul maxim de cavități al unei matrițe depinde de volumul total al acestora plus rețeaua de injectare precum și forța de închidere a mașinii de injectat.

Așezarea cavităților în matriță depinde de pregătirea proiectantului, de vechimea acestuia în proiectare sau chiar de ingeniozitate. Prin urmare poziționarea sau așezarea cavităților poate fi realizată orice mod se dorește.

Rețelele ramificate sunt de obicei prevăzute cu o porțiune gătită sau o prelungire a rețelei prevăzută în scopul permiterii materialului plastic să își continue drumul nestingherit prin rețelele secundare sau subrețele până la intrarea în cavitate.

În figura 2.8 se arată modul de dimensionare al unei cavități reci (cold slug) sau porțiuni gătuite [PMD, 2001] ce face parte dintr-o rețea de injectare. În cazul în care proiectarea rețelei nu s-ar fi realizat în acest mod și acea prelungire ar fi lipsit cotirea (punctul de joncțiune) [Cavalheiro, 2004] spre celelalte canale de distribuție realizându-se brusc, materialul topit s-ar fi solidificat în acest punct de trecere de la un canal la celălalt, reducând drastic posibilitatea de umplere a cavităților.





De câte ori o rețea este ramificată lățimea rețelei trebuie să fie mai mare decât înălțimea rețelei deoarece prin ramificații va curge material mai puțin și este mai economic să se utilizeze în rețele un minim de material.

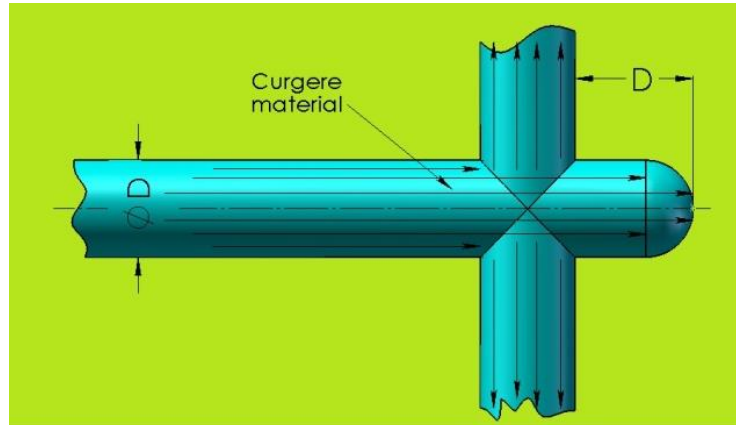


Fig.2.8. Evidențierea porțiunii gătuite în cazul rețelilor

Dacă într-o rețea am avea un număr  $N$  de ramificații relația între diametrul canalului principal  $D_p$  și diametrul canalului secundar  $D_s$  ar fi de forma următoare:

$$D_D = D_s \cdot N \frac{1}{3} \quad (2.13)$$

De obicei la toate intersecțiile canalelor unei rețele se utilizează acea cavitate răcită sau gătuire. Aceasta are rolul de a ajuta ca materialul să nu se solidifice prematur în momentul în care acesta ar trebui să urmeze frontul de curgere caracteristic canalelor următoare și a conduce materialul în stare topită înspre cavități. Lungimea acestui canal este prezentată în figura anterioară și este de obicei egal sau chiar mai mare decât lățimea rețelei și se întinde după intersecția a două canale de distribuție ale unei rețele.

Ca regulă generală diametrul rețelilor variază între 3mm și 10mm cea mai uzuală dimensiune fiind de 6mm. În cazul procesului de microinjectare dimensiunile pot fi altele și desigur acestea pot varia. Rețelele sunt la fel ca și culeea, mai scurte ca lungime respectiv cu o grosime mai mare. În nici un caz nu se recomandă ca grosimea rețelei utilizate să fie mai mică decât grosimea maximă de perete a piesei ce se injectează.

## 2.6. Tipuri de diguri utilizate la injectarea materialelor termoplastice.

Probabil că cel mai important fapt în proiectarea unei matrițe îl reprezintă alegerea tipului de dig utilizat, sau al orificiului prin care materialul topit ajunge în cavitatea matriței, care este de cele mai multe ori neglijat. [Fischer, 2003]

Digurile sunt considerate porțile de legătură sau conexiunile între rețelele de injectare și cuiburile matriței. [Goodship, 2004], [Drobny, 2007], [PMD, 2001] Modul de injectare poate fi diferit, acest lucru realizându-se datorită modului în care se găsește configurația digului. Prin urmare digurile pot fi de diverse tipuri:

**Dig de tip liniar/standard:** Acest dig este tipul cel mai utilizat [Drobny, 2007] la injectarea în matrițele ce au două sau mai multe cavități. Acest tip de dig se recomandă pentru piese mici și mijlocii care au o secțiune îngustă a pereților. Digul este amplasat de regulă la marginea produsului pe una din fețe și trebuie îndepărtat în urma injectării cu ajutorul unui tăietor/cutter. Digul este de cele mai multe ori amplasat pe planul de separație al matriței și în raport cu piesa poate fi poziționat deasupra, dedesubt sau în lateral. În figura 2.9 se pot observa câteva exemple de acest tip de dig.

Dimensiunile în cazul acestui tip de dig sunt în general de 80...100% din grosimea pieselor care sunt mai mari de 3,5mm și având o adâncime cuprinsă între 1...12mm. Lățimea acestor diguri este cuprinsă între 1...5mm iar distanța de la rețea la cavitate este cuprinsă între 0.5...1mm. Aceasta nu poate să depășească 1,5 mm lungime. Lățimea și înălțimea rețelelor pentru aceste tipuri de diguri se consideră astfel calculate ca înălțimea să fie aproximativ egală cu 0,7-0,8 din lățime. Lățimea digului poate să ajungă până la 7mm în cazul unor piese a căror greutate maximă este de 200 de grame.[Mould, 2008]

Digul standard este cel mai des utilizat în cadrul matrițelor din industrie fiind totodată aplicat la aproape toate tipurile de materiale termoplastice utilizate la realizarea de piese prin injectare.

Din figura respectivă se observă că digul este amplasat pe planul de separație al matriței. În primul caz digul se găsește pe placa poansonului care este și placa mobilă a matriței. Această așezare se utilizează în general atunci când pereții piesei nu prezintă înclinație sau nu au draft.

O altă așezare a digului poate să fie pe porțiunea plăcii cavității matriței utilizată în special pentru a ascunde locul injectării. În acest caz linia de separație a piesei este aleasă mai convenabil, metoda fiind din punct de vedere al costului mai ieftină și se utilizează la piesele cu pereții înclinați.

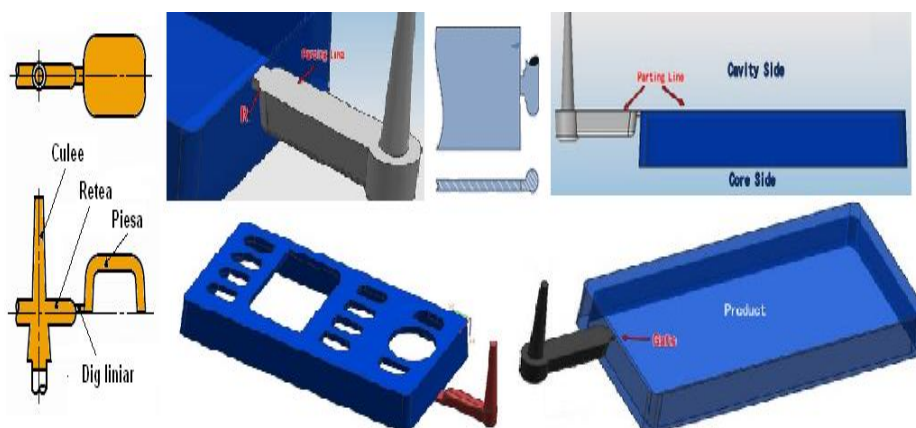


Fig. 2.9. Dig de tip standard [Mould, 2008], [Imold, 2011]

La așezarea digului la mijlocul liniei de separație al matriței modul în care trebuie să se aleagă secțiunea rețelei este simplu aceasta fiind de tip cilindric sau semicilindric.

Dezavantajele acestui tip de dig sunt posibilitatea apariției împrăștierii neuniforme a materialului și este obligatorie operațiunea de tăiere a digului în urma procedurii de injectare.

**Dig de tip tunel/submarin:** Prin injectarea cu canal tunel de la duză materialul plastic ajunge la cuibul matriței prin intermediul unui canal de distribuție pus în legătură cu un canal conic prelucrat în plan înclinat. [Șereș, 1996], [Jones, 2008] În figura 2.10 se prezintă o astfel de injectare cu canal tunel precum și modul de înclinare al acestuia.

De regulă, la injectarea unui material polimeric flexibil se recomandă o înclinare mare a unghiului digului iar la injectarea unui material rigid unghiul de înclinare al digului nu trebuie să fie mare. [Rosato, 2000] O conicitate a subrețelei se realizează la un unghi cuprins între  $30^\circ$  și  $45^\circ$  și se oprește acolo unde începe digul care prezintă o conicitate de  $15^\circ$  per fiecare parte (total  $30^\circ$ ). [Campo, 2006]

Poziționarea acestui tip de dig este flexibilă și poate fi utilizată pe orice parte a piesei (amplasată lateral) [Cavalheiro, 2004], aceasta fiind situată pe partea fixă sau mobilă a matriței dar trebuie avut în vedere faptul că designul trebuie să fie realizat cu atenție astfel încât la deschiderea matriței culeea să se rupă și să fie evacuată din matriță. Problema care se pune este ca digul să nu rămână blocat în matriță lucru ce ar duce la încetinirea productivității și o matriță cu un design necorespunzător. Dimensiunile frecvent utilizate pentru acest tip de dig sunt cuprinse între 0.8...1.5 mm (0.25...2mm diametru conform [Harper, 2000], [Jones, 2008]), diametrul mic, diametrul mare al canalului  $D=3\text{...}6\text{mm}$ , lungimea canalului  $L<5\text{mm}$  [Șereș, 1996], iar în cazul materialelor plastice ranforsate dimensiunile pot fi mai mari. Se recomandă ca dimensiunile digului să fie cuprinse între 30-70% din grosimea de perete a piesei.

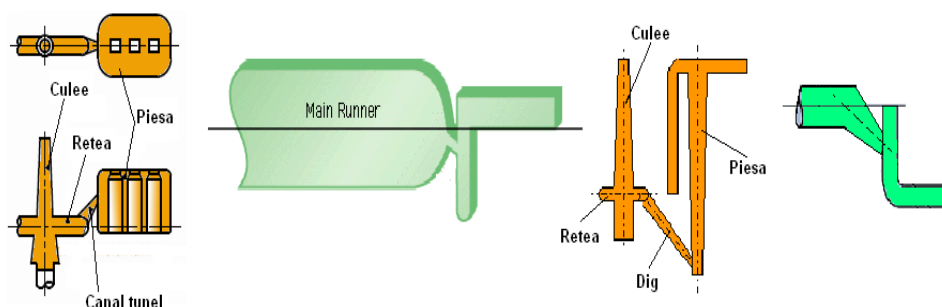


Fig.2.10. Dig de tip tunel înclinat [Imold, 2011], [RTP, 2011], [DSM, 2010]

Digul de tip tunel se găsește în două variante scurt sau lung iar cel mai preferat și des utilizat îl reprezintă tipul de dig scurt. [Campo, 2006]

Sistemele cu canal tunel sunt utilizate mai ales în cazul injectării unor materiale plastice cu elasticitate mare. La materialele plastice fragile se recomandă să se mărească diametrele canalelor de distribuție astfel încât la extragerea forțată a rețelei de injectare aceasta să fie elastică să nu se rupă.

Avantajele acestui tip de dig sunt trecerea tunelului de linia de separație la evacuarea piesei și rețelei precum și utilizarea unei rețele circulare.

Ca dezavantaje s-a constatat că la materialele ranforsate, rezultatele sunt slabe din punct de vedere al injectării iar materialul injectat poate să înghețe sau să se solidifice în dig înainte de a ajunge în cavitate.

O altă variantă a canalului tunel o reprezintă tipul de dig canal cu tunel curbat. [Șereș, 1996] Acest tip de dig de canal curbat este utilizat mai rar și este de preferat atunci când suprafața produsului trebuie să fie mată, lucioasă, când se cer condiții de calitate privind aspectul exterior al piesei. Extracția canalului curbat se



realizează ușor dacă canalul de distribuție conic are grosime mică. Astfel în momentul deschiderii matriței, atunci când piesa este aruncată de pe poanson de către aruncătoare iar rețeaua este aruncată de către aruncătorul central se produce o rețezare forțată în zona digului între piesă și rețea ceea ce duce la o extragere forțată a canalului curbat din locașul acestuia.[Mould, 2008]

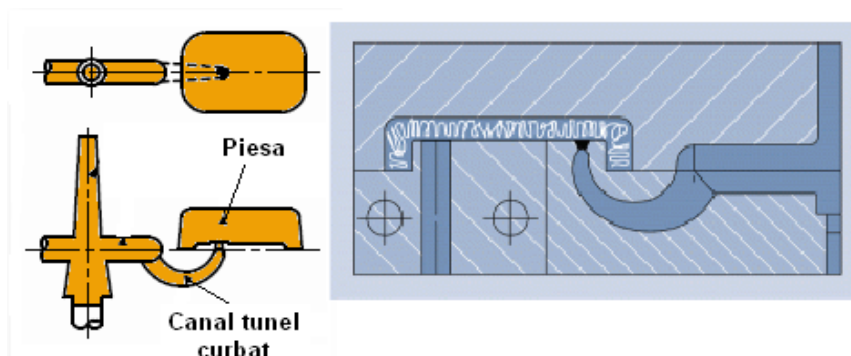


Fig. 2.11. Dig de tip tunel curbat[Imold, 2011][DSM, 2010]

Canalul de tip tunel curbat poate fi amplasat în matriță atât pe partea fixă cât și pe cea mobilă și este de preferat la injectarea roților dințate. [Șereș, 1996] Canalul curbat poate fi realizat direct într-o pastilă de o firmă specializată în acest scop sau poate să fie realizat în două pastile care vor fi asamblate ulterior în fiecare dintre acestea executându-se câte o jumătate de canal. Figura 2.11 este reprezentativă pentru un astfel de canal curbat. Injectarea cu acest tip de canal este convenabilă pentru realizarea roților dințate din materiale termoplastice datorită multitudinii punctelor de injectare. Ca avantaj al acestui procedeu se urmărește obținerea unei suprafețe mate, lucioase. Se consideră a fi cea mai bună soluție pentru materialele plastice amorphe. Dimensiunile pentru acest tip de dig sunt considerate a fi de 30...70% din grosimea de perete a piesei injectate.

Dezavantajul acestui tip de dig este utilizarea la scară redusă privind materialele plastice datorită faptului că prin însăși configurația și designul acestuia, curgerea materialului prin acest tip de canal se realizează cu dificultate.

**Dig de formă peliculară sau film** Piesele liniare cum sunt riglele de calcul, vizoare pentru calculatoare etc le sunt impuse condiții severe din punctul de vedere al proprietăților optice și a celor mecanice. Datorită faptului că proprietățile optice și cele mecanice sunt în stransă legătură cu proprietățile de curgere injectarea peliculară sau film este recomandată în aceste cazuri. [Harper, 2000]

Dezavantajele injectării unor astfel de piese printr-un punct sau prin mai multe puncte sunt eliminate prin utilizarea injectării peliculare astfel:

- ✓ Evitarea liniilor de întâlnire pe suprafața piesei;
- ✓ Evitarea incluziunilor de aer;
- ✓ O apreciere mai bună a contracției piesei injectate.

Injectarea peliculară se realizează astfel încât dintr-un canal de distribuție materialul plastic ajunge în cuibul matriței printr-un dig cu lățimea foarte mare între rețea și piesa injectată formându-se astfel un "film" sau o "peliculă" subțire. [Șereș, 1996][Drobny, 2007] Există o serie de soluții constructive pentru injectarea peliculară laterală. În cazul injectării unor piese cu suprafață mare în matrițele de injectat cu un singur cuib se aplică injectarea peliculară centrală. Pentru un

asemenea caz se utilizează de obicei o matriță cu deschidere prin bacuri pentru a elimina rețeaua de injectare. În figura 2.12 se prezintă o serie de modele de injectare peliculară sau de tip "film".

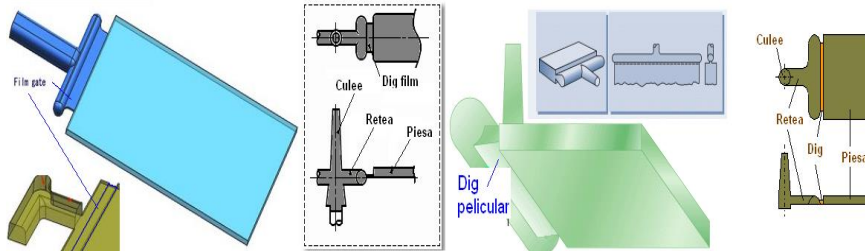


Fig. 2.12. Dig de tip pelicular sau film [Imold, 2011], [Mould, 2008], [DSM, 2010], [RTP, 2011]

Digul de tip "film" constă într-o rețea și un dig ce are o lățime egală cu întreaga porțiune sau latură a unei cavități. [Fischer, 2003] Acest tip de dig se utilizează cu precădere pentru piese de lungime mare dar subțiri [Goodship, 2004] la care curgerea să se facă filiform. O curgere cât mai uniformă este de o deosebită importanță pentru piesele realizate din materiale ranforsate și acolo unde se cere ca deformarea pe lungimea piesei să fie minimă.

Dimensiunile unui astfel de dig sunt de obicei mici și sunt cuprinse între 0.25...0.6 mm grosime și 0.5...1mm lungime (0.25-0.63mm lungime [Jones, 2008]) sau suprafața digului în funcție de greutatea și suprafața piesei ce se injectează.

Avantajele acestui tip de dig este că se pretează la injectarea materialelor plastice ranforsate iar dezavantajul constă în problema îndepărtării rețelei și digului de piesă, în urma acestui lucru constatându-se că nu se poate ascunde locul injectării acesta fiind vizibil pronunțat.

Digul de tip "evantai" face parte din familia digurilor de formă peliculară și se folosește în general pentru produsele întinse și plate fiind amplasat pe una din fețele laterale ale piesei și trebuind îndepărtat manual prin tăiere după injectare. Figura 2.13 este reprezentativă pentru acest tip de dig.

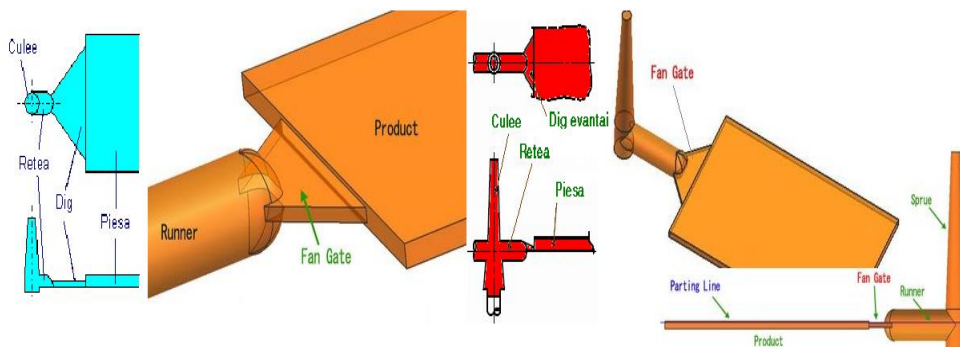


Fig. 2.13. Dig de tip evantai [Imold, 2011], [Mould, 2008], [GUT, 2011]

Acest dig este unul pelicular și poate avea grosimea pereților variabilă. Acest tip se utilizează pentru matrițe cu secțiune îngustă și care necesită injectarea fără îngheț sau solidificare prematură care ar putea fi favorizată de presiunea mică din

matriță sau de locurile unde deformarea și stabilitatea dimensională sunt mai pronunțate. Digul trebuie să prezinte o anumită înclinație astfel încât să se mențină o curgere constantă prin secțiunea acestuia. Acest lucru poate fi realizabil dacă:

- ✓ Vâscozitatea topiturii este constantă;
- ✓ Întreaga lățime a digului trebuie utilizată pentru curgere;
- ✓ Presiunea este aceeași pe întreaga lățime/suprafață a digului.
- ✓ Viteza de injectare este mică pentru reducerea imperfecțiunilor.

Dimensiunile recomandate la acest tip de dig sunt: grosimea care nu trebuie să fie mai mare de 80% din grosimea piesei iar lățimea digului variază de la 6mm până la 25% din lungimea cavității. [Jones, 2008] Pentru piese ce au o grosime de 0.8mm se recomandă ca digul să aibă o grosime de 0.7mm iar în cazul injectării cauciucului se recomandă folosirea unui dig cu 100% din grosimea piesei ceea ce dă o calitate mai bună a piesei injectate și un control mai bun curgerii materialului.

Avantajele acestui tip de dig sunt : permiterea unei umpleri rapide a unor piese de lungime mare precum și a celor cu secțiune dificilă. De asemenea umplerea unor piese de suprafață și lungime mare se realizează printr-un front de curgere uniform. Orientarea bună a moleculelor și frontului de curgere precum și eliminarea efectului de jetting pot fi amintite. [Fischer, 2003] Dezavantajul în acest caz constă în tăierea culeei și a rețelei.[DSM, 2010]

**Dig de tip punctiform/ ac** Prin injectarea punctiformă materialul ajunge direct la cuib printr-un canal cu o concitate foarte mare. În figura 2.14 sunt prezentate diverse tipuri de diguri punctiforme. [Șereș, 1996]

Digul de tip ac/punctiform se utilizează de obicei la matrițele cu mai multe cuiburi, poziționarea acestuia fiind flexibilă și injectarea realizându-se de obicei pe partea superioară a piesei. [Cavalheiro, 2004] Structura de bază a matriței în acest caz este complicată deoarece în această situație se utilizează metoda celor trei plăci /cu placă intermediară. [Rosato, 2000], [Șereș, 1996], [Drobny, 2007] [PMD, 2001] Digul trebuie să fie destul de slab pentru a se rupe fără a avea efecte negative asupra piesei. [Goodship, 2004] Acest tip de dig este preferat a se utiliza cu o secțiune cât mai mică. Designul pentru acest tip de dig trebuie să fie particularizat pentru diversitatea pieselor ce se injectează, necesitatea principală fiind asigurarea unei curgeri simetrice care să ducă la umplerea matriței fără probleme.

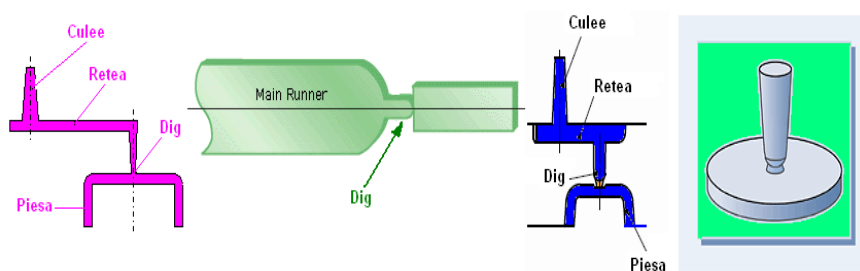


Fig 2.14. Diguri de tip punctiform [Imold, 2011], [GUT, 2011], [RTP, 2011]

În timpul funcționării matrițelor de injectat cu canale punctiforme pot să apară unele inconveniente la eliminarea rețelei datorită unor fire de material care rămân între piesă și rețea. Pentru eliminarea acestui inconvenient și pentru reducerea duratei ciclului de injectare s-a introdus o variantă îmbunătățită a sistemului și anume injectarea punctiformă cu antecameră. La această variantă digul punctiform vine în contact cu o porțiune mărită a canalului care formează

antecamera. [Șereș, 1996] La prima injectare antecamera se umple cu material plastifiat care având și rol de izolator permite injectarea continuă în zona centrală. O aplicare corectă a acestui procedeu presupune o injectare continuă deoarece oprirea mașinii ar duce la solidificarea materialului în antecameră și deci la imposibilitatea efectuării ciclului următor al injectării. [Imold, 2011]

Dimensiunile recomandate în cazul injectării materialelor plastice neranforsate sunt cuprinse între 0.8...6mm (0.6...2mm [Goodship, 2004]). Digurile care sunt mai mici decât cele descrise anterior nu se recomandă datorită faptului că se pot degrada termic dar există o marjă cuprinsă între 0.25-1.6mm [Harper, 2000], [Jones, 2008] utilizată în special la matrițele cu canale calde. În cazul injectării materialelor plastice ranforsate se recomandă ca digurile să fie mai mari de 1mm iar lungimea maximă a acestora să aibă valoarea de 1mm.

Avantajele acestui tip de dig sunt: design corespunzător pentru injectarea în matrițe cu multiple cuiburi, reducere de material plastic la injectare, ruperea rețelelor se realizează separat de piese. Un alt avantaj al acestui tip de dig este acela că digul de tip punctiform poate fi folosit/utilizat ca multiplicat/multipoint/multipunct în injectarea unei piese. [Rosato, 2000]

Dezavantaje: resturile de diguri pot cauza probleme prin rămânerea acestora în matriță ceea ce duce la blocarea umplerii unuia sau a mai multor cuiburi. Pentru a se diminua acest lucru se utilizează duze cu acționare pneumatică pentru eliminarea rețelei și a digului din matriță. Digurile punctiforme nu se utilizează în cazul unor polimeri cu vâscozitate mare sau a unora care sunt sensibili din punct de vedere al temperaturii. În cazul unei injectări punctiforme pe lateralul unei piese plate se observă apariția fenomenului de jetting care este fenomenul prin care materialul topit țâșnește de-a lungul piesei înaintea umplerii cavității

***Dig de tip culee*** Injectarea cu acest tip de dig este o injectare directă în sensul că digul propriu-zis îl reprezintă însăși culeea. [Kutz, 1998] Canalul central de injectare devine culeea el fiind amplasat pe partea superioară a produsului și fiind necesară îndepărtarea manuală a acesteia/acestuia după injectare. [Rosato, 2000]

Se recomandă a se utiliza pentru matrițe cu o singură cavitate [Goodship, 2004] și pentru piese ce necesită o umplere simetrică. [PMD, 2001] Acest tip de dig se utilizează atât pentru secțiuni mici cât și pentru secțiuni mari deoarece o menținere a presiunii are efect mai îndelungat la injectare. Se recomandă utilizarea unei lungimi mici a culeei ceea ce determină o umplere mai rapidă a matriței. În figura 2.15 este reprezentat digul de tip culee.

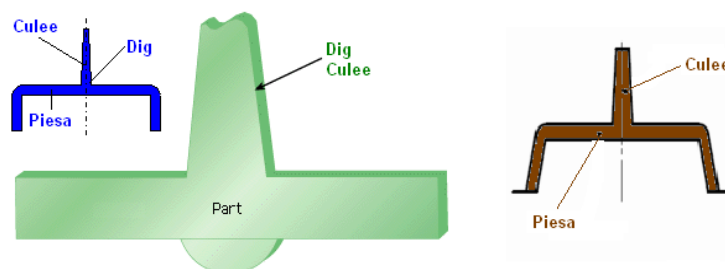


Fig. 2.15. Dig de tip culee [Imold, 2011], [RTP, 2011],[Mould, 2008]

Matrița în acest caz este ieftină deoarece materialul din rețea a fost eliminat iar presiunea de injectare a fost redusă direct la umplerea cavității. Dezavantajul la

acest tip de dig îl reprezintă adaosul de material rămas pe piesă în urma tăierii rețelei/culeei, care depinde de diametru, unghiul respectiv lungimea acesteia.

Nu se poate vorbi despre o eliminare curată, cu o suprafață bună a acestui tip de rețea. [Fischer, 2003]

Plastifierea materialului este controlată de alegerea unor pereți corespunzători ai rețelei în conformitate cu grosimea pereților piesei. În general contracția în rețea este mai ridicată iar în apropierea acesteia este mai scăzută. Rezultatul în acest caz îl reprezintă o tensiune la stress ridicată în apropierea digului.

Dimensiunea de început a culeei este controlată de duza mașinii de injectat. Astfel diametrul rețelei în apropierea duzei trebuie să fie cu 0.5mm mai mare decât diametrul exterior al duzei. În cazul utilizării unor bucșe standardizate de acest tip se cunoaște faptul că acestea sunt prevăzute cu un canal de formă conică cu o înclinație a peretilor de 2,4 grade deschiderea mare fiind înspre piesă. La punctul de injectare diametrul trebuie să fie de aproximativ 1,5 ori sau chiar dublu pereților piesei în acel punct. Diametrul culeei se consideră a avea valori între 1.5mm și 6,5mm iar lungimea culeei este cuprinsă între 1.6-12.5mm. [Jones, 2008] În cazul în care se utilizează bucșe nestandardizate de rețele acestea au un cost mai ridicat și o precizie mai mică iar o înclinație prea mică a pereților rețelei poate duce la imposibilitatea umplerii piesei și utilizarea unei înclinații prea mari a pereților rețelei duce la extinderea timpului de răcire și material plastic risipit.

De asemenea, dacă dimensiunea rețelei este prea mică, piesa rezultată poate să fie incompletă sau poate prezenta urme de exfoliere în apropierea punctului de injectare, iar dacă dimensiunea culeei este prea mare ciclul de injectare crește considerabil datorită faptului că materialul topit din culee se răcește destul de încet în centrul acesteia. [Rosato, 2000]

**Dig cotit (Tab gate)** Acest tip de dig este specific pieselor de lungime mare și grosime mică [Rosato, 2000] și se utilizează pentru a reduce forfecările ce pot să apară în matriță. [Harper, 2000] Forfecarea se realizează în general în apropierea digului, mai exact la legătura canalelor rețelei care sunt îndepărtate după injectare. Acest tip de dig este frecvent utilizat în cazul matrițelor de forma P.

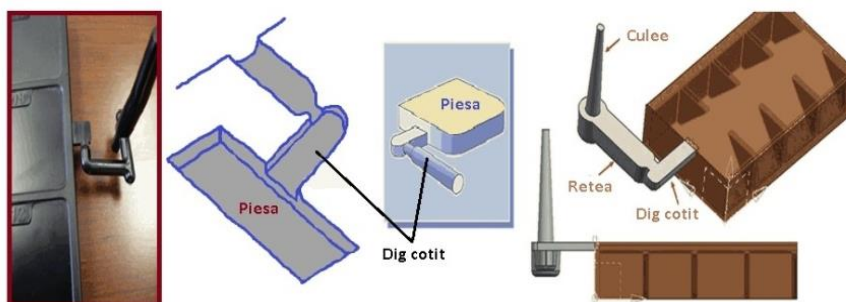


Fig. 2.16. Tipuri de diguri cotite (tab gate) [Mould, 2008], [GUT, 2011], [RTP, 2011]

Digul cotit reduce posibilitatea materialului de apariția fenomenului de jetting și prezintă o curgere echilibrată la matrițele multicuib. [Fischer, 2003]

În figura 2.16 se pot observa câteva tipuri reprezentative de asemenea diguri. Digul de tip cotit (*Tab gate*) se utilizează pentru diverse materiale termoplastice cum ar fi ABS, PS, acril, PP, PVC, policarbonat. [Jones, 2008]

Materiale ca SAN și altele care au o fluiditate relativ scăzută prezintă riscul forfecării dacă se utilizează acest tip de dig. [Harper, 2000]

În privința dimensionării acestor tipuri de diguri se recomandă ca grosimea pereților digului să fie egală sau puțin mai mică decât a piesei ce se injectează. În cazul în care se injectează componente ce sunt utilizate în industria cosmetică se preferă ca grosimea digului să fie aceeași cu grosimea pereților piesei.

O altă regulă ce se impune în privința acestor tipuri de diguri este poziționarea acestora dacă este posibilă cât mai înspre centrul piesei. În acest caz trebuie să se țină seama de forma și mărimea piesei ce se injectează.

Dimensiunile de bază pentru aceste tipuri de diguri sunt 6,5mm pentru lățimea canalului și grosimea acestuia trebuie să fie luată minim 75% din grosimea pereților piesei. [Jones, 2008]

Dezavantajul major al utilizării acestui tip de dig este acela că în urma îndepărtării digului pe piesă vor rămâne urme vizibile. [Campo, 2006]

**Diguri inelare.** Injectarea pieselor cu simetrie rotativă se poate realiza cu ajutorul sistemului de injectare inelară, sistem prin care materialul plastic dintr-un canal de distribuție inelar ajunge printr-un dig pelicular în cuibul matriței.

Injectarea inelară permite obținerea la piesa injectată a unei rezistențe mecanice ridicate, o precizie dimensională mai mare și evitarea urmelor de curgere a materialului. [Goodship, 2004] Injectarea inelară poate fi realizată cu canal de distribuție cu secțiune circulară la exteriorul piesei injectate sau la interiorul acesteia. În figura 2.17 este prezentat un tip de dig inelar interior sau un dig de tip diafragmă. Acest tip de dig este utilizat de regulă pentru injectarea unor piese de formă cilindrică sau rotundă și care prezintă un diametru interior deschis.

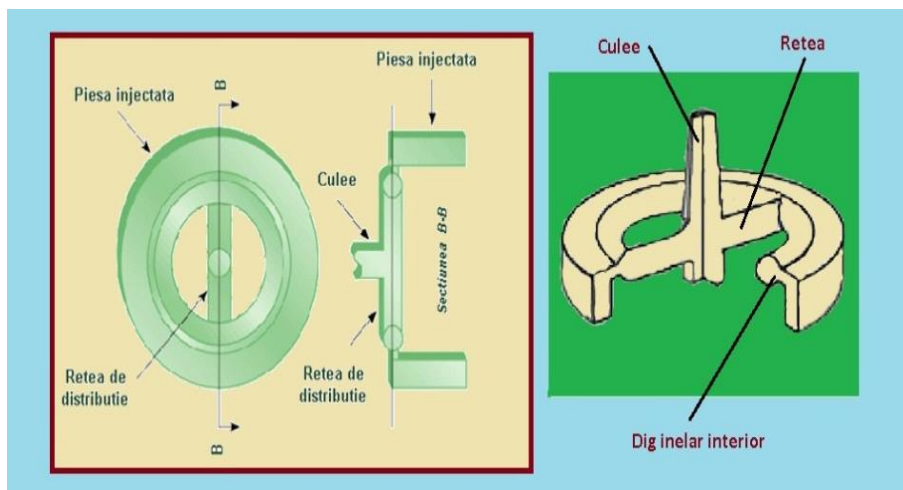


Fig. 2.17. Dig inelar interior [DSM, 2010], [RTP, 2011]

Se utilizează de regulă pentru matrițele cu o singură cavitate ce prezintă un diametru interior mic sau mediu și pentru matrițe cu mai multe cavități dacă se utilizează distribuitoare/blocuri calde. [Campo, 2006] Sunt utilizate în special atunci când concentricitatea prezintă o mare importanță și nu se acceptă linii de sudură pe suprafața piesei injectate. [Harper, 2000], [Rosato, 2000]

Un avantaj al acestui tip de dig ar consta în faptul că se poate menține o curgere uniformă pe toată suprafața digului. Grosimea pereților digului în acest caz



este cuprinsă între 0.25...1.5mm (40-60% x  $S_{max}$  – grosimea peretelui piesei) iar lungimea digului este de 1mm. [Jones, 2008] Dezavantajul digului de tip inelar interior constă în faptul că rețeaua trebuie îndepărtată în urma injectării. Îndepărtarea rețelei de injectare se realizează cu ajutorul unui perforator special sau a unei prese care are rolul de a produce forfecare între dig și piesă. [Fischer, 2003]

Digul de tip inelar exterior se prezintă în figura 2.18 și se utilizează în cazul injectării pieselor de tip cilindric sau circular în matrițele cu mai multe cavități sau atunci când nu se poate utiliza digul de tip inelar interior. Materialul intră în inelul exterior printr-o parte formând o linie de sudură în partea opusă a rețelei, linie care nu se transferă piesei. Dimensiunile sunt în general aceleași cu cele prezentate anterior la digul de tip inelar interior ( $L=1\text{mm}$ ,  $H=40-60\%S_{max}$ , diametrul inelului= $S_{max}+1\text{mm}$ ). [Campo, 2006], [Șereș, 1996]

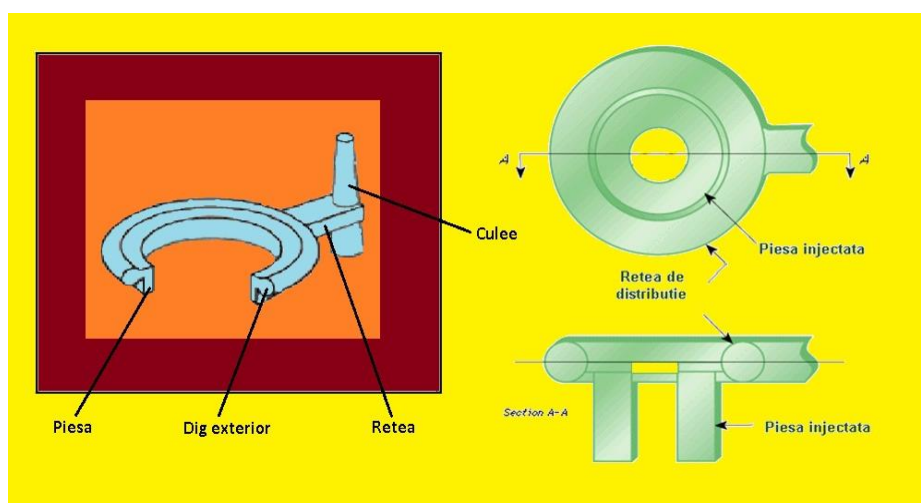


Fig.2.18. Dig inelar exterior [DSM, 2010], [RTP, 2011]

Tot în această categorie putem insera digul de tip umbrelă (specific pieselor tubulare: bușe, bobine etc-[Șereș, 1996]) care este un dig inelar interior cu o anumită conicitate (formă de pâlnie sau disc) precum și digul de tip păianjen (cruce-grosime 0.8-4.8mm iar lățime 1.6-6.4mm [Jones, 2008]) care are dezavantajul că nu permite o concentricitate perfectă iar piesele rezultate la injectare prezintă linii de sudură pronunțate. [Rosato, 2000]

Tipul de dig utilizat prezintă o importanță deosebită pentru o umplere compactă a cavității matriței, contracția piesei sau deformarea acesteia, anizotropie și stabilitatea piesei injectate. [Fischer, 2003]

Amplasarea pieselor sau cavităților în matriță trebuie să se realizeze și în funcție de alegerea punctului de injectare. Punctul de injectare ales necorespunzător poate avea efecte negative asupra curgerii materialului, contracției, stabilității dimensionale, orientării fibrelor și prezenței liniilor de sudură. [Drobny, 2007]

Un punct de injectare ales corespunzător încă din faza proiectării matriței sau în urma unei analize de curgere realizate reprezintă un factor de mare interes datorită faptului că injectarea se va realiza rapid și uniform. [Rosato, 2000] O serie de programe ce analizează umplerea pieselor injectate pot determina punctul optim de injectare pentru piesa respectivă astfel încât în funcție de rezultatele obținute se poate prelucra matrița dorită.

## 2.7. Concluzii.

Dacă în capitolul I s-a urmărit înțelegerea noțiunilor de curgere din perspectiva matematică prin evidențierea diverselor modele matematice pentru curgerea non-newtoniană, capitolul II prezintă o trecere în revistă a curgerii materialelor termoplastice din prisma/perspectiva chimiei.

Așa cum pentru matematică teoremele, postulatele, ecuațiile sau demonstrațiile sunt baza științei, pentru chimie baza o reprezintă substanța chimică utilizată, reacțiile chimice, interacțiunea dintre molecule sau atomi, masa moleculară și tipul de legături existente în reacție.

Materialele termoplastice prezintă proprietatea de curgere astfel încât în chimie, curgerea nu este privită din punct de vedere al mecanicii fluidelor ca și capacitatea de modificare a formei fluidului la transferul dintr-un recipient în alt recipient, ci este o formă complexă ce se desfășoară la nivel molecular sau macromolecular. Prin urmare pe chimist nu îl interesează ce formă v-a avea fluidul respectiv ci care sunt transformările principale din interiorul fluidului care pot să aibă efect asupra proprietăților sau utilizării viitoare al acestuia. Adică principalul obiectiv îl reprezintă legăturile moleculare, cum sunt acestea ținute laolaltă sau dacă se desprind sau se distrug respectiv care este motivul.

În cazul materialelor polimerice la injectare chimia punctează următoarele aspecte modul în care moleculele de material interacționează, modul de formare al macromoleculelor (miceli, sferulite) sau cum sunt formate legăturile intermoleculare și în final topitura de material care urmează să se solidifice după umplerea matriței. Problemele care apar în acest sens sunt legate de ruperea legăturilor intermoleculare (linii de sudură pe piesă) sau respingerea unor molecule față de alte molecule din topitură (goluri de aer, bule de apă pe pereții matriței sau impurități-metal, plastic etc).

În practică înainte de realizarea matrițelor și punerea acestora în funcțiune sunt utilizate programe care simulează curgerea materialului topit prin rețele și cavități în timp real. Aceste programe nu dau posibilitatea observării unor factori de natură chimică (interacțiunea între molecule, ruperea lanțului molecular) ci sunt axate pe studiul curgerii cu ajutorul matematicii cu rezultate pentru mecanica fluidelor (dacă cavitatea se v-a umple sau nu cu material topit). Asemenea programe specifice studiului curgerii vor fi utilizate într-un capitol viitor al prezentei teze de doctorat axate pe simularea umplerii unor piese de dimensiuni mici.

Din capitolul prezentat cititorul s-a putut familiariza cu noțiunea de rețea de injectare și dig al unei matrițe. Prezentarea unor tipuri de rețele era evidentă datorită faptului că acestea prezintă o importanță deosebită la injectare iar în lucrare se vor utiliza asemenea rețele în cadrul simulărilor. De asemenea digurile utilizate pentru diverse configurații geometrice ale pieselor sunt de mare importanță mai ales dacă sunt realizate matrițe multicuib. În elaborarea lucrării vor fi utilizate diverse tipuri de diguri în studiul curgerii materialului polimeric. Secțiunile rețelelor de injectat sunt considerate un alt element de mare însemnătate în cercetările care se vor realiza deoarece curgerea topiturii de polimer diferă în funcție de vâscozitatea materialului precum și în funcție de secțiunea canalului de injectat.

Aceste trei elemente specifice matrițelor de injectat, prezentate anterior prezintă o importanță deosebită atât în procesul injectării cât și din punct de vedere chimic prin faptul că ceea ce se întâmplă la nivel molecular sau macromolecular reiese evident în produsul finit.



## Cap. III – Microinjectarea. Particularități și aplicații ale procesului de microinjectare.

### **3.1. Microinjectarea. Noțiuni introductive și caracteristici.**

#### **3.1.1. Definiție. Prezentare generală.**

SUA utilizează în tehnică termenul de microinch, iar țările europene utilizează sistemul de unități metric astfel încât termenul utilizat este micrometru. Un micrometru este echivalentul la 39.37 microinch și se referă la valoarea de un micron care prin definiție reprezintă a mia parte dintr-un milimetru (1micron este 0.001mm). [Dubois, ...]

În ultimii ani se arată un interes deosebit pentru tehnologia microsystemelor [Lee, 2007], dorindu-se o dezvoltare a acestui substrat, al tehnologiei de injectare convențional la realizarea pieselor micro sau miniaturale, până la limita posibilului prin procedeul de microinjectare.[Sha, 2005]

**Microinjectarea** este o tehnică specializată și precisă de injectare orientată în mod special asupra componentelor microminiaturale. [Wintermantel, 2009] Microinjectarea se realizează în general, cu viteze de injectare și presiuni mai ridicate deoarece topitura trebuie împinsă în matriță prin duze cu orificiul foarte mic precum și canale de curgere specifice.

Piese obținute prin procedeul de microinjectare sunt piese de dimensiuni mici și foarte mici ce pot avea o configurație simplă sau mai complexă. Un reper de piesă poate să aibă și pereți subțiri dar și pereți mai groși. La realizarea acestor micropiese sunt întâmpinate o serie de greutăți cu privire la curgerea materialului în matriță și umplerea cavităților acesteia.

În industria electronică se cunosc diverse micropiese obținute prin procedeul de microinjectare utilizate în special la sistemele audio-video, calculatoare, aparate de uz electrocasnic, stații de emisie-recepție.

De asemenea în industria auto și a mașinilor cu comenzi numerice se utilizează diferite tipuri de senzori. Totodată în medicină sunt utilizați biosenzorii care sunt cunoscuți pentru detectarea unor produse chimice, a celulelor și a altor agenți biologici. Aceștia din urmă își găsesc aplicații în industria auto dar și a securității în cazul locuințelor.

Procedeul de microinjectare se aplică cu succes în obținerea diverselor lentile, micropompe, roți dințate miniaturale, piese utilizate în biomedicină și instrumente microfluidice. [Sha, 2005]

O definiție mai elaborată a microinjectării ar putea fi dată astfel: procedeul de injectare a pieselor obținute din materiale polimerice, de dimensiuni mici și foarte mici cu greutăți de câteva grame sau chiar miligrame, obținute în matrițe prevăzute cu microcavități realizate pe mașini speciale de injectat destinate procedeului de microinjectare, întregul proces fiind diferit față de injectarea convențională și fiind necesară regândirea acestuia pas cu pas. [Giboz, 2011]

### 3.1.2. Particularitățile procesului.

Procesul de micro-injectare al materialelor polimerice este un proces complex, specific fabricării unor componente destinate tehnologiei microsistemelor. [Giboz, 2011], [Zhao, 2002] Procesul de microinjectare poate fi practic împărțit în două domenii tehnologice: injectarea unor piese care prezintă suprafețe microstructurale și injectarea unor piese cu o greutate mică și cu pereți subțiri. Aceste două domenii sunt specifice în realizarea de producții de masă de piese injectate prin microinjectare specifice microsistemelor.

Injectarea pieselor "micro" nu este recomandată a se efectua pe mașini mai mari de 20 tone (sunt utilizate mașini între 5 și 50 de tone în producție) deoarece controlul presiunii de injectare este greu de realizat. [Mikell, 2001] În principiu mașinile utilizate în laboratoare nu sunt folosite pentru producția de masă fiind proiectate doar cu scop de cercetare.

Microinjectarea este considerată a fi una din tehnologiile cheie pentru realizarea de serie și masă de micropiese datorită unui preț de cost relativ scăzut. Calitatea suprafețelor și caracteristicile cuibului reprezintă în procesul de fabricație o constrângere importantă de care trebuie să ținem cont pentru aplicațiile din microinginerie.

Studiile au aratat că în general, la creșterea temperaturii de injectare la maxim precum și a celei a matriței se îmbunătățește viteza de injectare, polimerul reușind să umple microcavitățile cu specificația că există totodată o creștere a ciclului de injectare. [Sha, 2005] Cu toate acestea setările amintite anterior pentru microinjectare pot avea efecte negative pentru diverse materiale polimerice.

Procesul de microinjectare trebuie să fie stabil, melcul ales corespunzător și procesul să fie controlat pentru evitarea obținerii de micropiese rebut. Principalele eforturi făcute pentru realizarea microinjectării au fost concentrate în special pe faza de realizare a umplerii matriței. Pentru a se putea îmbunătăți procesul de microinjectare au trebuit făcute diverse modificări în cadrul procesului la nivel comparativ cu injectarea convențională. Pentru evitarea efectului de polimer ars precum și a golurilor de aer la injectare, pe mașinile de injectat s-au atașat sisteme de vidare, mai exact pompe de vidare. De obicei, aceste probleme de goluri de aer găsite la piesele microinjectate sunt datorate inserțiilor folosite și configurațiilor complicate.



Fig.3.1. Piese obtinute prin microinjectare [Bourell, 2011][ Mikell, 2001][AKI, 2010]

Matrițele care sunt realizate pentru microinjectare se închid la scurt timp înainte de începerea ciclului de injectare a polimerului. Mai mult, pentru ca polimerul să curgă în cavități fără ca acesta să se solidifice sau să înghețe, la mașina de

injectat se atașează de regulă un sistem de încălzire extern pentru încălzirea matriței ceea ce duce la ușurarea curgerii materialului în cavitățile matriței. Cea mai utilizată tehnică de încălzire a matriței este aceea cu ulei încălzit al cărui consum de energie este de regulă mare. Cu ajutorul inductorului de încălzire constatările făcute au fost că nu trebuie încălzită toată matrița cum se obișnuiește la injectarea convențională ci numai porțiunea microcavităților ceea ce duce la evacuarea mai ușoară a micropieselor din matriță.

Procedul de microinjectare este unul dintre procedeele eficiente din punct de vedere al costului privind producția de serie și masă a micropieselor din material polimeric. Când dimensiunile pieselor injectate sunt mici factorii neglijați în mod normal la injectare pot juca un rol important la microinjectare. În principal unul din factorii de discutat ar fi rugozitatea cavităților matriței care poate să aibă efect asupra volumului pieselor realizate prin microinjectare.

În cele ce urmează se vor prezenta câteva exemple de piese utilizate în diverse domenii obținute cu ajutorul procedurii de microinjectare. Așa cum se observă din Fig.3.1 piesele obținute prin procedul de microinjectare pot avea configurații dintre cele mai diverse, de cele la simple la cele mai complexe. Desigur că imaginile prezentate în figură sugerează și greutatea acestor microcomponente care poate să fie mică sau foarte mică. De regulă piesele obținute prin microinjectare au greutatea de la câteva grame la câteva zeci de grame dar există frecvent și repere a căror greutate poate fi sub un gram.

Figura 3.1 prezintă piese cu o greutate sub un gram, carcasa pentru o pompă de apă (0.325 grame) și bobina realizată din acetal (0.3mg/piesă) precum și comparația unor piese realizate prin microinjectare cu o monedă sau un CD. Din figură se pot observa dimensiunile acestora care sunt de asemenea miniaturale, lungimea plăcilor de bobină fiind de 1mm iar carcasa și piesele comparate nedepășind lungimea de 10mm.[Mikell, 2001]

Injectarea pieselor din materiale polimerice cu o greutate de câteva grame sau miligrame reprezintă azi o provocare pentru marile firme producătoare datorită numărului mare de sectoare industriale ce folosesc micropiese cum ar fi industria electronică, industria medicală, industria telecomunicațiilor, industria auto etc.[Shen, 2004] Prin aplicațiile realizate limita atinsă până acum în domeniul micropieselor ar fi acelea cu o greutate de 0,0003 grame și pereții subțiri de 0,0004 in (10 $\mu$ m), toleranța acestora fiind de  $\pm 0,0005$  in, iar producția de rebuturi la un lot de 100 000 de piese realizate fiind de maxim 6. [Mikell, 2001]

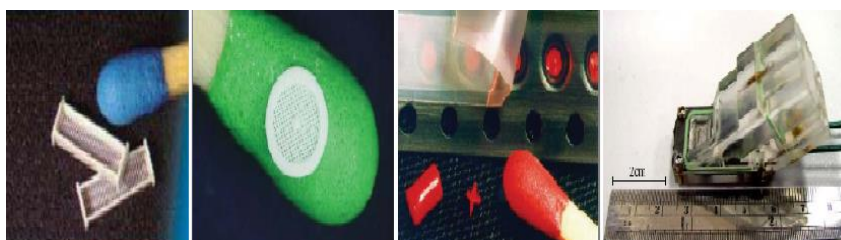


Fig.3.2. Piese microinjectate [BMB, 2003], [Pan, 2007], [ECS, 2007]

În figura 3.2 se poate observa o comparație între piesa rezultată și măciulia unui băț de chibrit punându-se astfel în evidență dimensiunile mici ale piesei. Aceeaș figură prezintă un ansamblu care nu depășește 4 cm în lungime ceea ce dovedește faptul că majoritatea elementelor componente ale acestuia au dimensiuni

foarte mici. Piesele pot să aibă forme și configurații diverse, acest lucru depinzând doar de domeniul aplicativ în care sunt încadrate acestea.

Pentru obținerea unor astfel de piese de dimensiuni mici trebuie să ținem cont de **orientarea materialului** în matriță precum și **contractia** acestuia. Orientarea materialului în matriță se referă la aliniamentul lanțurilor moleculare ale topiturii de polimer, supusă forfecării sau compresiunii, care sunt mai puternice în apropierea punctului de injectare și devin tot mai slabe cu cât ne îndepărtăm de acesta. Privind orientarea, cele mai puternice legături ale topiturilor de polimer sunt cele la care lanțurile moleculare sunt alinate paralel unele față de celelalte, pe lungimea frontului lor de curgere rezistența fiind mai mică decât perpendicular pe frontul de curgere. [Rosato, 2000]

Privind contractia, valorile contractiei liniare la o matriță sunt determinate experimental ca fiind diferența între piesa injectată și cavitatea matriței. Nu se poate vorbi despre contractia normală a unei piese (obținute prin injectare sau microinjectare) decât după un interval de 48 de ore de la injectare, interval de timp în care piesa a fost supusă unor condiții standard de temperatură și umiditate relativă. Acest fapt este important cu precădere la materialele polimerice semicristaline și cele higroscopice. Dimensiunile unor piese injectate din polimeri amorfi cum este polistirenul pot să se stabilizeze în mai puțin de 20-30 de minute. De asemenea există și materiale polimerice care rețin apa, stabilitatea dimensională a acestora fiind compromisă datorită acestui fapt prin reținerea de către piesă a unei cantități de apă din atmosferă ceea ce duce la o umflare și o creștere a dimensiunilor piesei. [Fischer, 2003]

Contractia produsului injectat sau microinjectat va fi întotdeauna creată pe poanson, departe de cavitatea matriței astfel încât să faciliteze extracția sau demularea ușoară a piesei, acesta fiind localizat pe partea mobilă a matriței.

Dimensiunile finale ale unei matrițe pentru microinjectare vor fi evaluate cu ajutorul următoarei formule:

$$D = P + S$$

unde,

D=dimensiunea finală a matriței [mm];

P=dimensiunea produsului [mm];

S=valoarea contractiei. [%]



Fig.3.3. Defecte apărute la piese obținute prin microinjectare[Sammoura, 2006][NRC, 2007]

În procesul de microinjectare pot apărea **defecte** pe piesele injectate astfel încât piesele nu mai pot fi funcționale. Dintre aceste defecte amintim: prezența unor puncte de culoare închisă pe suprafața piesei, piesă incompletă, zonă de material ars din piesă datorat efectului Diesel, bavuri în planul de separație, exfoliere, decolorare a piesei, linii de sudură vizibile, variații de greutate considerabile a pieselor din aceeași injectare sau de la cicluri de injectare diferite, fisuri în piesă,

deformații ale piesei, demulare dificilă ș.a. Figura 3.3 este reprezentativă pentru piese realizate prin procedeul de microinjectare ce prezintă defecte de umplere.

Microinjectarea ( $\mu$ IM) este considerată a fi, așa cum s-a arătat mai sus cel mai eficient proces de producție la scară largă pentru micropiese obținute din materiale termoplastice reprezentând totodată ultima treaptă pe scara injectării convenționale dar necesitând o regândire a fiecărei părți din proces. [Giboz, 2007]

Mașinile de microinjectare au început să se dezvolte încă din anii 90 și există comparații între cele realizate atunci și cele existente în prezent. La realizarea matritelor de microinjectare s-au folosit tehnici ca litografierea (LIGA), micromașini cu laser, mașini de frezat cu scule miniaturale și mașini de micro-electroeroziune ( $\mu$ EDM). [Giboz, 2007]

Figura 3.4 este reprezentativă pentru înțelegerea mărimii (dimensiunile mașinii sunt mici în comparație cu mașinile de injectat convenționale) și robusteții acestor tipuri de mașini de injectat.



Fig.3.4. Mașina de microinjectare. [Babyplast]

În ultimii ani s-a arătat un interes deosebit în tehnologia microsistemelor și se așteaptă ca în următorii zece ani acest fenomen să se amplifice. Analizii prevăd un puternic impact privind producția microsistemelor pe piața mondială.

Dintre caracteristicile majore privind procesul de microinjectare putem aminti: timpul de gelificare între 15-45min, ciclul de injectare <15s-8min, temperatura este izotermală sau variotermală, inserții de materiale testate-oțel, cupru, oțeluri aliate, silicon, ceramică, majoritatea materialelor polimerice utilizate, cel mai mare raport între lățimea și înălțime este 17 pentru suprafețe libere, 25 pentru structuri adânci și 1750 pentru un gilaj sau grătar, mașinile utilizate sunt mașini industriale standard uneori modificate, iar evacuarea pieselor se realizează prin vacuum, aer comprimat sau ventuze dacă ventilația în matriță nu este asigurată de găuri sau canale realizate în planul de separație. [Piotter, 2006]

### **3.1.3. Diferențe față de injectarea tradițională.**

Microinjectarea reprezintă un proces de obținere a unor piese miniaturale a căror volum este cuprins între 0.5-1.5cm<sup>3</sup> iar *nanoinjectarea* reprezintă procesul prin care se obțin piese ce au un volum cuprins între 0.5-10mm<sup>3</sup>. [Harper, 2004]

Microinjectarea se referă la matrițe cu o precizie de  $\pm 10$  micrometrii sau chiar mai puțin a pieselor și componentelor miniaturale a căror volum nu depășește  $1\text{cm}^3$ . Piese realizate au o greutate sub un gram ele reușind chiar să aibă o greutate sub 20 miligrame (0,020g) și chiar de 0.01grame. [Rosato,2000] Microinjectarea reprezintă un proces specific în care sunt utilizate matrițe ce pot varia termic sau care prezintă un aparat de vidare atașat cavităților pentru a sprijini curgerea materialului polimeric respectiv umplerea. [Wintermantel, 2009]

În cazul procesului de microinjectare factorii care afectează suprafața pieselor injectate sunt temperatura cilindrului de injectare, diametrul acestuia, viteza de injectare, diametru sau lățimea canalului de injectat, presiunea de menținere, timpul de menținere și temperatura matriței. [Sha , 2005]

În comparație cu injectarea convențională unde **temperatura matriței** poate fi aleasă între limita superioară de injectare și limita inferioară, la microinjectare se recomandă ca temperatura matriței să fie la limita superioară a materialului polimeric sau dacă este posibil în apropierea temperaturii de tranziție vitrosă a materialului astfel încât umplerea să fie realizată în condiții optime și fără probleme. [Yuan, 2003], [Giboz, 2007]

Injectarea materialului în matriță trebuie să se realizeze **rapid** astfel încât să nu apară fenomenul de degradare. Pe lângă acesta microinjectarea se realizează la **presiuni ridicate** injectarea propriu zisă fiind cuprinsă între 2-8 secunde uneori ciclul de injectare depășind 12-15 secunde, acesta ajungând până la câteva minute în cazul în care cavitățile sau grosimile de perete sunt extrem de mici.

**Forța de închidere** trebuie să fie **mică** la mașinile de microinjectat comparativ cu forța de închidere utilizată de mașinile de injectat standard. Dimensiunile melcului și ale pistonului sunt cu mult reduse în comparație cu cele utilizate la mașinile de injectat convenționale precum și utilizarea a două unități separate una pentru plastifiere iar alta pentru injectare. [Giboz, 2007]

La mașinile de microinjectat sistemul prezintă pe lângă unitatea de dozare (melcul mașinii) un piston cu ajutorul căruia se injectează precis volumul de material necesar piesei sau familiei de piese dorite. [Galway, 2010]

La mașinile pentru microinjectare sunt utilizate șuruburi (melcul mașinii de injectat) care au un diametru minim de 12mm [Giboz, 2007] iar granulele de material purverulent utilizate trebuie să aibă dimensiuni mici sau foarte mici pentru a nu torsiona șurubul. Chiar dacă diametrul pistonului mașinii poate fi ales în mod liber de către inginer astfel încât volumele mici de dozare să fie realizate se constată că problema majoră o reprezintă timpul relativ lung de injectare. O altă caracteristică în microinjectare o reprezintă faptul că piesele pot fi evacuate din matriță cu ajutorul mijloacelor convenționale adică a unor ace aruncătoare a căror diametru minim poate fi 0,3mm [Wintermantel, 2009] pe lângă un sistem cu vacuum sau cu ventuze (în cazul extracției CD/DVD-urilor din matriță).

Pe lângă vacuum și aruncătoare în cazul microinjectării se pot folosi la evacuarea pieselor din matriță vibrațiile ultrasonice sau un mecanism de retragere a sistemului injectat (rețea și piese) din matriță. [Giboz, 2007]

Dintre particularitățile și diferențele microinjectării față de injectarea convențională amintim: culori mai bine definite ale piesei injectate, piesa este mult mai ieftină, matrița pentru microinjectare este mai ieftină, cicluri de lucru rapide, obținerea unor piese cu o geometrie complexă și acuratețe ridicată a pieselor obținute prin procedeul de microinjectare. [Iclanzan, 2010], [AKI, 2010]

În tabelul 3.1 se prezintă un rezumat a ceea ce înseamnă diferențele existente în cazul microinjectării în comparație cu injectarea convențională, diferențe care sunt clar delimitate pentru cele două procedee.



Tabelul 3.1 [Giboz, 2011]

Componenta procesului	Injectarea convențională	Microinjectarea
Mașina	Mașini electrice și hidraulice Forța de închidere >15t	Mașini electrice sau electro-pneumatice. Forța de închidere <15t
Simularea curgerii	Calculul 2 sau 1/2D	Se recomandă calculul 3D
Concepția matriței	Reguli CAD privind geometria piesei. Diametrul digului >1mm.	Simularea privind dimensiunile și poziționarea canalului de injectat cu diametrul digului <1mm
Realizarea matriței	Mașini CNC sau electroeroziune	Mașini CNC sau electroeroziune, LIGA, microelectroeroziune, prelucrare cu laser, frezare electro-chimică.
Plastifierea	Melc cu $\Phi > 20\text{mm}$ încălzit termic	Melc sau pistonul de plastifiere cu $\Phi < 20\text{mm}$
Injectarea	Rata la forfecare $< 10^4\text{s}^{-1}$	Melc sau pistonul de injectare cu $\Phi < 20\text{mm}$ . Rata la forfecare $> 10^6\text{s}^{-1}$
Temperatura	Recomandată de producător	Mai mare decât cea recomandată. Existența unui proces varioterm în matriță.
Menținerea	Comutarea realizată în funcție de presiune sau de cursa pistonului.	Comutarea bazată pe poziționarea pistonului sau melcului. Solidificarea rapidă a digului.
Răcirea	În general câteva zeci de secunde	Răcire instantanee
Controlul piesei injectate	Masa piesei și dimensiunile ei	Toleranțele dimensionale și funcționarea piesei

### 3.1.4. Cerințe restrictive ale microinjectării.

Microinjectarea reprezintă un proces complex care prezintă o serie de cerințe restrictive sau constrângeri. Dintre acestea amintim: materialele utilizate la microinjectare (nu toate materialele polimerice pot fi procesate prin procedeul de microinjectare); matrița utilizată în proces (dimensiunile acesteia sunt cu mult mai mici decât în cazul matrițelor convenționale și trebuie adaptată pe mașina de microinjectat); mașina de injectat cu caracteristicile specifice și modul de obținere sau prelucrare al matrițelor pentru microinjectare

#### 3.1.4.1. Materiale utilizate la microinjectare

Materialul termoplastice pentru procedeul de microinjectare se alege în funcție de mai mulți factori specifici procedeului: configurația piesei, destinația acesteia și acelor condiții de funcționare ce i se impun.

Dintre factorii ce țin de tehnologie amintim următorii :

- *Uniformitatea granulelor.* Datorită faptului că se dorește dozarea uniformă în cilindrul mașinii granulele ce sunt utilizate trebuie să aibă același volum, să fie uniforme fără a fi sfărâmate sau tăiate.
- *Conținutul de apă redus în granulă.* Granulele sunt în general uscate

înainte de a fi introduse în pâlnia de alimentare a mașinii, deoarece se evită prezența apei în topitură aceasta determinând evaporări în cilindru mașinii ceea ce duce la instabilitate în procesul de microinjectare.

- *Stabilitate termică și chimică.* În timpul microinjectării materialul plastic este supus unor presiuni și temperaturilor înalte, acesta trebuind să prezinte stabilitate fără a se degrada termic sau a se descompune chimic. În producție nu se dorește obținerea de piese injectate cu defecte sau rezistență mecanică slabă datorită materialului plastic degradat din cilindru.

- *Contractii mici.* La realizarea micropieselor se alege un material termoplastice care în cazul preciziei dimensionale să asigure toleranțele impuse.

Dintre factorii ce țin de piesă și proprietățile acesteia amintim:

- *Durata de viață a piesei injectate.* Pentru micropiesele ce sunt supuse unor solicitări mari materialul este ales cu atenție în urma unor simulări pe calculator în care se aleg diverse materiale de încercat.

- *Configurația piesei.* Este obligatoriu să ținem cont în alegerea materialului la microinjectare de piesele cu inserții sau cele care prezintă intersecții de pereți sau au grosimi de pereți variabili.

- *Calități optice și de transparență.* Doar puține dintre materialele plastice pot să confere proprietățile optice sau de transparență dorită.

- *Solicitări termice în exploatare.* Diverse micropiese injectate trebuie să facă față unor condiții de exploatare la temperaturi ridicate, de unde rezultă o restrângere a materialelor ce vor fi utilizate la realizarea acestora. Uneori se recomandă ca materialul ales în realizarea micropieselor să nu se ardă.

- *Solicitări mecanice.* În alegerea injectării unor micropiese ce trebuie să fie supuse unor solicitări mecanice intense se ține cont de rezistența mecanică a materialului, materialele plastice armate fiind preferate în aceste cazuri.

- *Solicitări de natură electrică.* Micropiese se găsesc în număr relativ mare în industria electronică unde pot fi utilizate ca izolatori. Pentru aceste piese se ține cont de următorii factori: rezistența la străpungere, rezistența la izolație, rezistența suprafeței și constanta dielectrică.

- *Solicitări de natură chimică.* Dacă micropiesele realizate sunt utilizate în mediu agresiv chimic vom constata că materialele din care sunt obținute acestea sunt cuprinse într-o arie foarte restrânsă.

- *Costul materialului.* În general prețul materiei prime influențează direct costul piesei microinjectate, factor ce trebuie să fie luat în considerare încă din faza de concepere a piesei.

Materialele termoplastice pentru microinjectare sunt în general aceleași cu cele utilizate în injectarea convențională cu specificația că unele dintre acestea se comportă negativ din punctul de vedere al umplerii cavității matriței. Se găsesc de asemenea câteva materiale noi utilizate doar în cazuri speciale sau în laboratoare.

Materialele termoplastice sunt livrate de către producători sub formă de pulbere sau granule cu diferite forme geometrice : lenticulare, sferice, cilindrice sau cubice.

La procedeul de microinjectare s-au utilizat în scop de cercetare diferite materiale termoplastice cu rezultate mai bune sau mai puțin bune funcție de designul sau complexitatea piesei. Au existat cercetări în vederea microinjectării cu materiale termoplastice de tipul celor transparente cum ar fi: policarbonatul (PC), polimerul ciclo-olefin (COP), stiren-acrilonitril copolimer (SAN), hexafluorpropilena-tetrafluoretilena-etilena (HFP -et-TFE).

La aceste materiale temperaturile matriței și a topiturii au fost cele recomandate de producători iar ceilalți parametri de injectare cum ar fi viteza de



injectare, presiunea la injectare, timpul de menținere, cantitatea de material injectată fiind variabile, analiza micropieselor realizându-se cu ajutorul microscopului. La umplerea cavităților matrițelor s-au observat neajunsuri datorate vitezei de injectare, cantității de material, diametrul pistonului, cel mai important factor fiind tipul materialului. Cea mai mare reproductibilitate a pieselor a fost dată de policarbonat (PC) iar cea mai mică de SAN.

În afara materialelor amintite mai sus vom enumera și alte materiale polimerice utilizate la procedeul de microinjectare cum ar fi:

- ABS - acrilonitril-butadien-stiren copolimer;
- PEEK – polieteresterconă;
- PP – polipropilena;
- LCP – polimer pe bază de cristale lichide;
- PPS – polifenilensulfură;
- PA – poliamidă;
- PET – polietilentereftalat;
- PSU – polisulfonă;
- PBT – polibutilentereftalat;
- POM – poliacetal;

În principiu această listă nu se oprește aici ea continuând și cu alte materiale plastice mai puțin utilizate la microinjectare: PEI; HDPE, LDPE, TPE; PMP; TPU etc.[FKHG, 2011], [Bourdon, 2002], [Mikrotech, 2007]

#### 3.1.4.2. Matrița sau sula pentru microinjectare

În cazul microinjectării se recomandă realizarea de matrițe cu mai multe cuiburi considerându-se că cele cu un cuib sau două cuiburi sunt neproductive într-o linie de producție de acest gen.

În figura 3.5 sunt prezentate câteva tipuri de matrițe destinate realizării pieselor ce se doresc a fi obținute prin procedeul de microinjectare. De asemenea figura prezintă o comparație realizată între o matriță obișnuită și o matriță pentru microinjectare în care dimensiunile spun totul/sunt reprezentative. Astfel se pot observa un număr redus de plăci ale matriței și plăcile de aruncare ale acesteia realizate în afara plăcii de prindere mobilă.

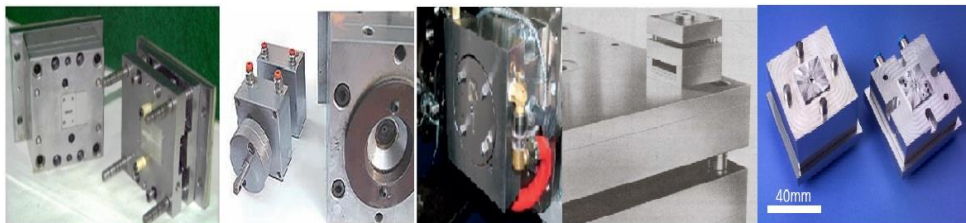


Fig. 3.5. Matrițe pentru microinjectare.[Babyplast][ Dubois][IPT,2009][Imgrund,2007]

Figura prezintă și reprezentarea unor matrițe deschise astfel încât putem observa modul de amplasare al pastilelor în acestea. La realizarea acestor matrițe pentru microinjectare trebuie să se țină cont de mașina pe care acestea vor funcționa astfel ca dimensiunile matriței să nu depășească dimensiunile de lucru recomandate pentru instalarea pe platourile mașinii.

Matrițele pentru micropiese se realizează în general cu scule de precizie ridicată care sunt în măsură să obțină cavități de dimensiuni mici fie ele simple sau de complexitate ridicată, scule ce se vor prezenta într-un subcapitol viitor.

Este cunoscut faptul că fiecare matriță este unică prin însăși construcția ei, prin alegerea planului de separație, prin alegerea dispunerii cuiburilor, prin tipul de rețea utilizată, prin utilizarea diverselor duze sau a unor blocuri calde etc.

Temperatura matriței la microinjectare se recomandă a fi aproape de temperatura maximă la injectarea convențională sau se consideră apropiată de temperatura de tranziție vitroasă ( $T_g$ ) sau chiar de punctul de topire al materialului ( $T_m$ ) utilizat. [Giboz, 2007]

#### 3.1.4.2.1 Rețeaua,

Rețeaua la matrițele de microinjectat se alege în funcție de configurația piesei proiectate și de numărul de cuiburi din matriță. Secțiunea rețelei poate fi circulară, semicirculară sau trapezoidală în funcție de alegerea proiectantului iar dimensiunile acesteia pot fi diverse.

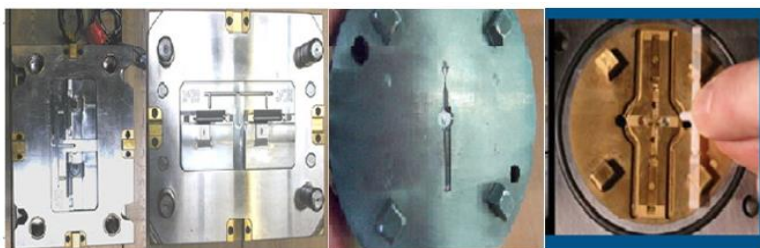


Fig. 3.6. Tipuri de rețele utilizate la microinjectare [Imgrund, 2007], [UMS, 2011]

Se observă în figura 3.6 că în anumite cazuri pentru diverse matrițe sau piese rețeaua de injectare a fost concepută și realizată să aibă dimensiuni mai mari decât piesa ceea ce face ca umplerea cavității matriței să se realizeze ușor, caz diferit de cel în care se concepe o rețea care să aibă dimensiuni mai mici decât piesa și la care pot apărea probleme de umplere.

Matrițele utilizate în cadrul procesului de microinjectare au în principiu cam aceeași construcție ca și cele normale, diferența dintre acestea fiind desigur dimensiunile mici dar și prezența pe placa de aruncare a unui număr redus de aruncătoare. Acolo unde se utilizează dimensiuni mari ale rețelelor în cazul microinjectării aruncătoarele sunt axate pe lovirea rețelei mai puțin a piesei injectate, forța impusă să determine și evacuarea piesei din matriță.

În proiectarea și dimensionarea rețelei trebuie să ținem cont de grosimea de perete a piesei ce se injectează, volumul de material injectat, sistemul de răcire pentru rețea și diguri, distanța de la cavitate la culee, tipul secțiunii ales pentru rețea, vâscozitatea materialului și viteza de injectare. [Campo, 2006]

Amplasarea rețelei în matriță depinde de următorii factori: numărul de cuiburi, forma geometrică a pieselor, tipul matriței respectiv tipul și poziționarea digului. [Goodship, 2004] Specialiștii recomandă ca, în cazul folosirii unor rețele cu mai multe rețele secundare sau subrețele, dimensiunea ultimei rețele să fie mai mare decât grosimea de perete a piesei cu 0.040 in ( $\sim 1\text{mm}$ ). [Campo, 2006] De asemenea se recomandă ca grosimea minimă a rețelelor să fie 1.5mm. [Jones, 2008]

ANEXA 3.1. prezintă o serie de dimensiuni specifice rețelelor utilizate în injectarea convențională în funcție de vâscozitatea materialului utilizat (diametrul rețelei și lungimea maximă de curgere a acesteia). Aceste valori s-au adaptat conform celor de la DSM Engineering Plastics care au prezentat conform [DSM, 2010] dimensiunile care sunt cu roșu în tabel ( $\phi$  3, 6, 9 și 13mm).

Utilizând aceste rețele date de cei de la DSM am folosit regula de trei simplă pentru aflarea lungimilor maxime din 0,5 în 0.5mm de la diametrul rețelei de 3mm la cel de 15mm pentru materiale cu vâscozitate scăzută respectiv vâscozitate ridicată. Constatarea făcută în urma întocmirii tabelului respectiv a fost că pentru materialele cu vâscozitate scăzută de la diametrul de 3 la 9mm pentru lungimea maximă a rețelei există o progresie aritmetică cu rația 16,65, iar de la diametrul de 9mm la cel de 15mm rația progresiei scade la 6.25. Și în cazul materialelor cu vâscozitate ridicată s-a constatat existența unor rații înjumătățite parcă față de cele prezentate anterior. Astfel pentru diametrul rețelei de la 3...9mm pentru calculul lungimii maxime a rețelei s-a folosit rația 8,5 iar pentru diametrul rețelei cuprins între 9...15mm s-a constatat o rație a progresiei de 3,2.

Rezultatele notificate în tabel sunt relativ abstracte datorită dimensiunilor de lungime obținute cu zecimale (Ex: 226.6mm) motiv pentru care, din considerente raționale acestea s-au aproximat superior sau inferior.

Conform tabelului realizat pentru injectarea convențională în acest sens, se dorește realizarea unui tabel specific pentru dimensionarea lungimilor maxime de rețele de injectare sub 3mm diametru specifice procedurii de microinjectare, tabel care se va realiza în capitolul următor al lucrării urmând ca valorile obținute să fie validate prin intermediul simulărilor de curgere.

#### **3.1.4.2.2 Cavitatea,**

Cavitatea în cazul microinjectării prezintă o mare importanță deoarece aceasta reprezintă modelul de piesă ce se dorește a fi obținut. Cavitățile la microinjectare nu diferă prea mult de cele folosite la injectarea convențională din punctul de vedere al proprietăților pe care trebuie să le îndeplinească, mai mult datorită dimensiunilor reduse pe care acestea le prezintă.

Cavitatea este considerată a fi inima procesului de injectare și trebuie să fie realizată cu precizie ridicată astfel încât dimensiunile piesei injectate să se încadreze în toleranțele dimensionale impuse. [Brent, 2006]

Suprafața cavității trebuie să reproducă întocmai condițiile piesei ce se injectează. [Rosato, 2000] De aceea la prelucrarea cavităților de matrită se folosesc diverse procedee (frezare, electroeroziune etc) menite să determine forma dorită a cavității precum și finisarea suprafețelor obținute.

Finisarea suprafețelor cavităților de matrită sau plăcilor matritelor se împarte în patru categorii: lustruirea sau șlefuirea cu diamant, lustruirea cu hârtie, lustruirea cu pietre abrazive și șlefuirea suprafețelor cu aer comprimat. Fiecare dintre aceste categorii prezintă trei grade de precizie, primul grad fiind cel mai bun sau cel mai ridicat iar gradul trei este gradul cel mai scăzut de prelucrare. În cazul cavităților destinate pieselor pentru microinjectare se preferă șlefuirea suprafețelor cu aer comprimat după procesul de electroeroziune respectiv lustruirea cu diamant sau pietre de rectificat în cazul obținerii cavităților prin frezare. Dacă piesele trebuie să prezinte texte sau gravuri pe suprafață se utilizează "microtexturarea" ce reprezintă un proces mecanic de abraziune, mai exact o pulverizare a suprafeței cavității cu oxid de aluminiu.

Înclinarea pereților cavității sau draftul cavității reprezintă unul din elementele decisive în eliminarea pieselor din matriță. Înclinația pereților matriței poate să aibă 1...2° iar la piese mari înclinația poate să fie cuprinsă între 3-5°. În cazul procesului de microinjectare pereții matriței pot să aibă 1-2° sau pot să nu aibă draft deloc, datorită dimensiunilor mici scoaterea pieselor din matriță nu reprezintă o problemă majoră. Injectarea unor materiale elastice sau cauciucuri nu necesită o înclinație a pereților matriței. [Rosato, 2000]

În figura 3.7 sunt prezentate o serie de cavități sau cuiburi realizate pentru anumite piese de dimensiuni relativ mici.

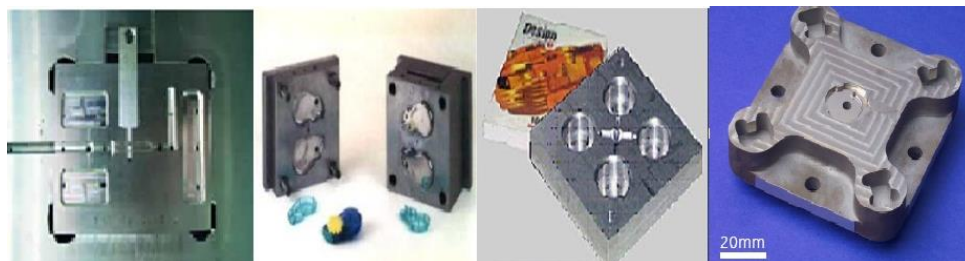


Fig.3.7. Tipuri de cuiburi [IPT, 2009], [FKHG, 2011]

Cuiburile sau cavitățile matriței pot fi realizate direct în placa de formare sau pot fi realizate în pastile, ce sunt prevăzute cu diferite coturi sau colțuri (cu umăr), cu diverse cleme pentru asamblarea cu alte piese sau subansamble ale matriței, realizate din materiale care prezintă o rezistență superioară la acțiunea temperaturii materialului termoplastic topit. Pastilele sunt mai ușor de utilizat deoarece pot fi înlocuite foarte ușor iar prelucrarea acestora este mai simplă în comparație cu o prelucrare complexă a pieselor și rețelei în placa de formare.

Cercetările realizate până în prezent în acest domeniu al microinjectării în privința realizării de matrițe au dus la formarea unor tipuri de cuiburi de configurație simplistă sau mai complicată a căror dimensiuni este foarte redusă, întreaga piesă rezultată fiind de maxim 1mm.

### 3.1.4.2.3 Ventilația și răcirea matriței la microinjectare,

Ventilația în cazul injectării permite aerului din interiorul matriței să părăsească cavitatea astfel încât să nu existe defecte în piese, lucru realizat cu ajutorul unor mici canale cu o adâncime de 0.01 mm până la 0.06 mm (0.015...0.08mm [Brent, 2006], [Jones, 2008]), cu o lungime de la 1-3mm ce sunt conectate direct la atmosferă/mediu înconjurător.[Harper, 2000]

Specific microinjectării nu se pot prescrie date exacte în privința ventilației dar se presupune că adâncimea canalelor este cuprinsă între 0.005-0.025 mm adâncime (depinde de grosimea de perete al piesei injectate), iar lungimea canalelor de la 0.5...1.5mm. De asemenea se pot realiza canale de ventilație la coturile rețelelor sau la intersecția cu subrețelele menite să asigure o curgere fără restricții în matriță cu efecte în beneficiul pieselor injectate privind dimensiunea lor.

Absența ventilației în matriță poate să conducă la o injectare scurtă ce are ca urmări o umplere incompletă a matriței [Harper, 2000], ardere sau scorjire a suprafeței piesei, contracție a piesei respectiv corodarea cavităților datorită gazelor. Mai nou sunt utilizate metale poroase ce au proprietatea de a permite gazelor să treacă prin ele dar nu permit topiturii de polimer acest lucru. [Goodship, 2004] În absența utilizării materialelor poroase, cel mai adesea se utilizează un aruncător al

piesei din matriță (de dimensiuni reduse) pe post de aerisitor (materialul acumulat aici se îndepărtează prin tăiere ulterior) sau prin vacuum. [Drobny, 2007]

Din figura 3.5 din reprezentarea comparativă a matrițelor se poate vizualiza existența unor canale realizate în plăcile de formare ce seamănă foarte bine cu un bloc încălzit mai exact cu rezistențele legate la termocuplele de tensiune. Desigur că în cazul unor astfel de matrițe de dimensiuni mici se pot găsi blocuri calde mici care să satisfacă nevoia de menținere a temperaturii matriței la un anumit nivel sau canalele ce există în plăci sunt de fapt sistemele de răcire ale matriței. Datorită faptului că blocurile calde sunt relative scumpe se obișnuiește ca prin aceste sisteme de răcire ungere să circule ulei încălzit la o anumită temperatură care să mențină matrița la o temperatură optimă. Se evită pe cât posibil utilizarea unui ulei rece pentru că, dacă se dorește o utilizare ciclică destinată producției de serie, acesta trebuie să fie în permanență cald astfel încât să nu se obțină piese cu defecte sau piese rebut datorită răcirii pereților cuibului ce pot avea efecte nedorite asupra calității și a piesei.

Răcirea la microinjectare se realizează prin canale de răcire cu dimensiuni de 6mm (uneori de 4mm dacă configurația pieselor o impune) prin care apa sau uleiul utilizat trebuie să curgă turbulent. Se preferă o răcire doar în apropierea cuiburilor matriței ceea ce are un efect pozitiv privind calitatea pieselor injectate.

Rata sau viteza de răcire a unei matrițe este influențată și de materialul utilizat la fabricarea matriței. Astfel o matriță realizată din cupru-beriliu transferă de două ori mai multă căldură decât o matriță realizată din oțel carbon și de patru ori mai multă căldură decât o matriță realizată din oțel inoxidabil. Matrițele ce sunt realizate din cupru-beriliu se pretează la piese cu pereți subțiri iar ciclul de injectare este mai rapid decât în celelalte cazuri. [PMD, 2001]

#### **3.1.4.3. Mașini de injectat specifice procesului de microinjectare și caracteristicile acestora.**

Pentru realizarea unor piese prin procedeul de microinjectare se utilizează mașini de injectat cu o capacitate de injectare și un gabarit mai mic decât cele convenționale. În general unitatea de închidere a acestor mașini nu depășește pragul de 50 maxim 70..100 tone forță. De regulă sunt utilizate mașini pentru microinjectare ce au o capacitate cuprinsă între 20-35 tone forță.

Pentru alegerea unei mașini de injectat pentru amplasarea unei matrițe specifice procesului de microinjectare trebuie să ținem seama de diverși parametri tehnici specifici mașinii: diametrul melcului, raportul L/D, presiunea maximă de injectare, volumul teoretic de injectare, rata de injectare, cursa melcului și viteza de rotație, forța de închidere a matriței, forța de deschidere maximă, viteza de închidere și deschidere a matriței, cursa platoului port-matriță, distanța între coloane, înălțimea de montare a matriței, masa mașinii, puterea mașinii și dimensiunile (LxlxH) specifice mașinii. [Șereș, 1996]

În acest domeniu există 11 producători de mașini destinate procedeului de microinjectare a căror luptă este acerbă privind calitatea respectiv serviciile oferite în acest sens. Dintre acestea amintim: Arburg, Battenfeld, Boy, Demag Ergotech, Ettlinger, Ferromatik Milacron Europe, Nissei, Sodick, Sumitomo, Tomken Tool și Van Dorm Demag. [Mikell, 2001]

În cele ce urmează se vor evidenția câteva dintre mașinile de injectat consacrate procesului de microinjectare precum și avantajele pe care acestea le prezintă iar în ANEXA 3.2. sunt prezentate caracteristicile generale și forța de închidere pentru diverse mașini de injectat. De asemenea ANEXA 3.3. prezintă o

serie de mașini de injectat cu un diametru al cilindrului cuprins între 14...25mm și caracteristicile acestora extrase din baza de date a programului MoldFlow, mașini utilizate la simularea umplerii diverselor piese concepute.

### **Masina de microinjectare Babyplast.**

**Babyplast** este considerată a fi în ultimul deceniu pionierul de mașini de microinjectat care a reușit să producă piese cu greutate cuprinse între 0,01g și 15g având peste șapte mii de aplicații. [Babyplast] Aceste mașini de microinjectat oferă o soluție necostisitoare, dar și practică pentru a reuși respectiv a face față cu brio cererii de miniaturizare a unor produse de pe piață. În figura 3.8 este prezentată o mașină de microinjectat Babyplast precum și o serie de tipuri de piese obținute cu această mașină.



Fig. 3.8. Mașina de microinjectat Babyplast [Babyplast, 2007], [AKI, 2010]

Avantajele mașinii de injectat **Babyplast** sunt: diversitatea materialelor plastice și a elastomerilor care se pot injecta, costuri inițiale minime și de energie reduse 3KW dar și costul redus al sculelor de lucru precum și precizia ridicată a pieselor injectate. Mașina se consideră a fi ideală pentru producția de serie sau unicat, este ușor de operat, de setat și de întreținut fiind utilizată cu succes în scop educațional sau training.

Injectarea pe această mașină se realizează în condiții bune de lucru, costurile fiind mici iar existența micropistonului care să elimine aerul din matriță în timpul injectării ajută pentru ca matrița să fie umplută corespunzător cu topitură de material. Pentru injectare se poate utiliza unul dintre cele cinci diametre standard pe care le poate avea pistonul, se realizează autopurjarea pentru pornirea simplă și închiderea iar injectarea pe aceasta mașină are avantajul de a reduce presiunea din matriță și a minimaliza pierderile de material. [Babyplast, 2007]

Unitatea hidraulică de închidere prezintă avantajul că sculele au un cost relativ scăzut și pot fi realizate modificări rapide pe mașină. Sistemul hidraulic al mașinii are printre avantajele următoarele: sensibilitate la presiune joasă pentru protecția matriței, plăcile și aruncătoarele acționează ca niște perne ocupând un loc cât mai restrâns ceea ce dă posibilitatea cavității să beneficieze de un spațiu mai mare. Înlocuirea matriței pe mașină se poate realiza foarte rapid.

Sistemul de control al mașinii este coordonat de două microprocesoare puternice iar pe un monitor al mașinii sunt observate timpul de injectare și temperatura ce pot să fie modificate de operator de la tastele existente în jurul acestui monitor în spatele căruia se găsește de fapt un calculator încorporat. Setările și controlul mașinii se realizează rapid și simplu și în cazul în care se dorește



o injectare de piese a căror greutate este de ordinul subgramelor. Complet automatizată nu este nevoie ca mașina să fie asistată la ciclurile de injectare ea putând fi programată când să-și înceapă programul de injectare. Are o capacitate de memorare de până la 100 de setări în cazul unei matrițe, parametrii cheie fiind parolați și codați automat, precizia și controlul injectării fiind îmbunătățite datorită proporționalității forțelor hidraulice.

Mașina prezintă un zgomot redus în timpul procesului de injectare. Forța de închidere a mașinii este de 62,5 kN, greutatea acesteia fiind de 120 kg, capacitatea încărcăturii de ulei de 16 litri și diametrul pistonului de 10, 12, 14, 16 sau 18 mm iar dimensiunile acesteia sunt L1050mm x W523mm x H740mm. [Babyplast, 2007] Volumul de material injectat în funcție de diametrele pistoanelor amintite anterior este 4, 6.5, 9, 12 și 15 cm<sup>3</sup> (10, 12, 14, 16 și 18mm).

#### **Masina de microinjectat Microsystem 50.**

O altă firmă specializată în producerea mașinilor destinate microinjectării este **Battenfeld**. În producția de piese de microprecizie, Battenfeld are mulți ani de experiență precum și o expertiză specială în tehnologia ambelor mașini de injectat fie acestea convenționale sau de microinjectat precum și în concepția procesului tehnologic. Mașina de vârf a firmei este denumită **Microsystem 50** și este evidențiată în figura 3.9 împreună cu tabloul de comandă.



Fig. 3.9. Mașina de microinjectat Microsystem 50.[BMB, 2003], [Fuchs, 2007]

Pe mașina **Microsystem 50** cu o capacitate de închidere a matriței de 50 kN (5tf) și cu mișcarea de servoconducere [BMB, 2003], forța de deschidere a matriței este de 10 kN, matrița ce poate fi montată pe mașină are dimensiunile maxime de 196 x 156 mm, o presiune maximă de injectare de 2500 bari și un diametru al cilindrului de 14 mm. Greutatea mașinii de injectat este de aproximativ 1050 kg.

Pe această mașină pot fi realizate piese sub 0,1grame având o unitate de dozare și un melc pe verticală și un piston care împinge materialul în cavitate pe orizontală. O secțiune în acest sens este prezentată în figura 3.10.[BMB, 2003]

Dintre piesele care pot fi realizate pe această mașină amintim roți dințate din acetal cu o greutate de 0,8mg, piese din PC specifice aparatelor auditive ce au

2mg respectiv diverse piese miniaturale pentru plăcile de circuit integrat (pini) realizate din LCP cu o greutate de 16mg. La asemenea piese miniaturale putem afirma că datorită greutății pe care o au acestea pot zbura în aer datorită electricității statice. [Rosato, 2000]

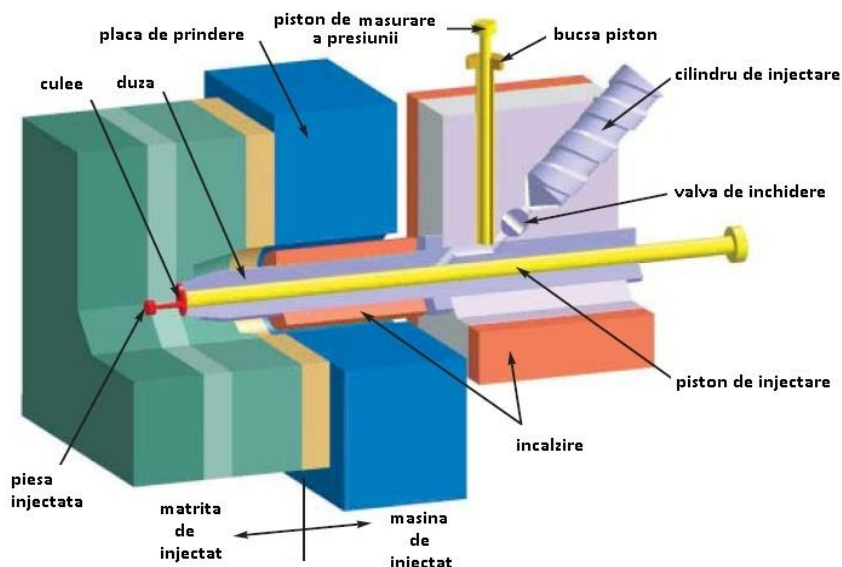


Fig.3.10. Secțiune prin unitatea de injectare Microsystem 50 [BMB, 2003]

Întregul proces de producție se realizează în camera de curățire înainte ca topitura să ajungă la cuiburile matriței. În această cameră materialul topit nu poate fi contaminat cu microimpurități sau alte particule. Unitatea de injectare crează un proces stabil iar injectarea și timpul ciclului de injectare este redus simțitor. Mașina are o tavă mobilă care să țină în siguranță piesele și să le transporte în siguranță. Controlul se realizează cu ajutorul unui calculator încorporat denumit Unilog B4.

Softul și comenzile mașinii sunt simple și ușor de înșușit. Pe ecranul monitorului se observă piesa în timpul procesului și parametrii din proces iar de la butoane se pot modifica acești parametri de către operator.[Fuchs, 2007]

Unitatea de închidere respectă paralelismul cerut și principalul obiectiv al firmei a fost siguranța matriței. Matrițele sunt furnizate de firma Microsystems UK Ltd, care este partenerul/distribuitorul de scule/unelte a firmei Battenfeld specializată în construcția de matrițe și piese microinjectate. [BMB, 2003]

#### **Masina de microinjectat UN2K-15.**

O altă mașină de microinjectare este prezentată în figura 3.11 fiind vorba despre tipul UN2K 15 realizat de compania Ching Hwee.

Mașina poate să aibă de la 15 la 20 tone forța la închidere, dimensiunile ei fiind 1,2 m(L) x 1 m(l) x 0.81 m(H), ciclul de injectare al acesteia fiind sub 3 secunde. Presiunea cu care se poate injecta poate fi de 3600kg/cm<sup>2</sup> iar piesa are stabilitate dimensională. Mașina se recomandă a fi utilizată pentru producție mică ea fiind la stadiul actual de dezvoltare și având o înaltă precizie. [Hwee, 2007]

Ferromatik Milacron Europe a realizat mașini de microinjectare ce pot să realizeze piese care să aibă o greutate cuprinsă între 0,001 și 3 grame. Cilindru de



preplastifiere este înclinat la 45° față de pistonul mașinii și are un diametru de 18 mm iar pistonul prezintă un diametru de 7mm. Producătorii susțin că mașina produsă de aceștia oferă rezultate mai satisfăcătoare în comparație cu mașini de microinjectat ce au un cilindru cu un diametru de 14mm. De asemenea unitatea poate fi adaptată în scopul injectării bicomponente. Se pare că cea mai mică piesă realizată pe o asemenea mașină de microinjectat a avut 0,08 grame și a fost realizată din acetal pe o matriță cu opt cuiburi destinată industriei medicale. Greutatea totală de material injectat în acest sens a fost de 1,6g.



Fig. 3.11. Mașina de microinjectat UN2K-15 [Hwee, 2007]

TR20EH este o mașină de microinjectat electrică hibridă realizată de firma Sodick. Cantitatea de material injectat în matriță poate fi sub 0,2g iar melcul/cilindrul mașinii are un diametru de 14mm. Pistonul mașinii are o cursă de 5mm din care ultimul 1-1,5mm asigură presiunea de compactizare. Viteza de injectare poate atinge valoarea de 1500mm/sec. [Mikell, 2001]

Cei de la Arburg se laudă cu ajutorul mașinii pentru microinjectat hidraulică Allrounder 220 S de 17 tone ce are un melc de 15mm diametru, un piston de 3mm diametru care poate să injecteze în matriță exact 50mg de material.

Pe lângă cele prezentate anterior mai există și alte firme care produc mașini destinate procedului de microinjectare care fie sunt doar la stadiul de dezvoltare ca firmă în acest domeniu, fie au producție proprie și limitată sau sunt la stadiul de cercetare în acest domeniu.

### **3.2. Particularități ale sculelor destinate uzinării matrițelor pentru microinjectare.**

Cuibul matrițelor de injectat este realizat în general prin procedeul de electroeroziune cu electrod filiform sau cu electrod masiv și cu ajutorul sculelor așchietoare. În cele ce urmează ne vom axa pe realizarea matrițelor pentru microinjectare prelucrate cu scule așchietoare, scule create de firme specializate.

### **3.2.1. Scule destinate îndepărtării materialului prin aşchiere pentru microcavități.**

În figura 3.12 se pot observa tipurile de scule cu care se prelucrează suprafețele miniaturale ale cuiburilor matrițelor. Dintre acestea amintim: burghie, alezoare, lărgitoare, freze, cuțite diamantate și scule pentru gravat.



Fig. 3.12. Tipuri de scule miniaturale utilizate in microinjectare.

În figura 3.13 există șase tipuri de scule destinate prelucrării cavităților matrițelor. În speță în prima imagine se prezintă scule destinate realizării de gravuri având mărimi diferite, urmate apoi de două scule pentru adâncire și țesire, burghie cu diametre diferite, tarozi ce au dimensiuni diverse, lărgitoare și diferite tipuri de freze ce lucrează la viteze ridicate.



Fig. 3.13. Microscule pentru prelucrarea cavitatiilor.

Sculele miniaturale pentru frezat (microfrezele) sunt cele mai uzuale pentru prelucrarea de microcavități, ele fiind cel mai des utilizate în producția de serie și nu numai. Microfrezele sunt utilizate pe centre de prelucrare cu comenzi numerice (CNC) și dau o mare productivitate, calitatea suprafețelor obținute fiind de asemenea ridicată. Datorită faptului că frezele trebuie să poată prelucra atât cavitatea cât și poansonul în cazul matrițelor deplasarea acestora se realizează după contur pe baza unui program integrat.

În figura 3.14 sunt prezentate tipurile uzuale de freze care sunt folosite în cazul prelucrării microcavităților.

Pentru frezele radiale universale de uz general, diametrul de prelucrare este situat între 0,10mm și 6 mm, lungimea acestora fiind de 38 și 50mm, diametrul cozii între 3...6mm iar lungimea utilă a sculei între 0,3 și 18mm indiferent dacă freza are 2 sau 4 dinți. În cazul frezelor radiale de lungime scurtă majoritatea dimensiunilor lor rămân nemodificate excepție făcând lungimea utilă a acestora cuprinsă între 0,15mm și 9mm. Microfrezele radiale ce prelucrează la viteza de

așchiere mare au lungimi de 38 și 50mm, lungimea de atac/prelucrare cuprinsă între 3mm și 18mm, diametrele părților de prindere de 3, 5 și 6mm precum și diametrul capului de lucru al frezei cuprins în intervalul 1...6mm. De asemenea există și freze ce au conicitate de 30° a căror lungime este de 38 și 50mm, lungimea utilă fiind între 0,2 și 19 mm, diametrul cozii de 3 și 6mm iar diametrul de lucru având valori cuprinse între 0,10 și 2,5 mm.

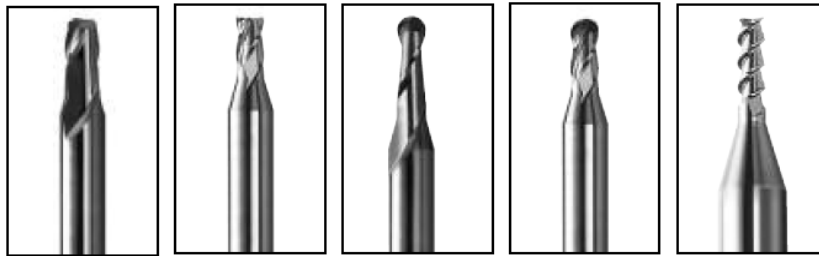


Fig.3.14. Freze în miniatură

Japonezii de la NS TOOL CO.LTD. sunt producători și distribuitori de scule așchietoare destinate prelucrărilor de precizie ridicată de dimensiuni mici, frezele fiind punctul forte al acestei firme. Aceștia produc o serie de freze diverse destinate domeniilor de larg interes, cele mai mici realizate de aceștia fiind prezentate în figura 3.15 unde se pot observa și caracteristicile geometrice ale frezei. La o asemenea precizie de prelucrare respectiv de fabricație frezele au un cost relativ ridicat dacă ne raportăm la o comparație cu prețul sculelor uzuale.

Tabelul 3.2 prezintă caracteristicile geometrice ale acestor tipuri de freze și prețul de achiziție ale acestora per bucată.

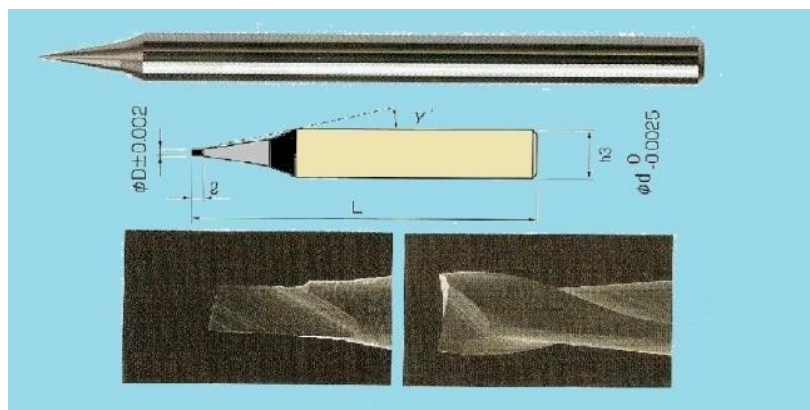


Fig. 3.15. Freze miniaturale, cu un dinte și cu doi dinți [NsTool, 2006]

Conform tabelului 3.2 se observă o diferență considerabilă între prețul acestor freze miniaturale în comparație cu o freză ce are 2mm diametru a cărui preț de achiziție este în jurul valorilor de 45-70 de Euro. Pe lângă aceste freze ce au un diametru de 10 microni firma se mai laudă cu tipurile de freze speciale pentru frezarea rețelelor de matrițe. În acest sens există freze cilindro frontale cu o anumită înclinație la un anumit unghi respectiv freze cu cap sferic cu aceeaș

înclinație specifică secțiunilor semicirculare, paraboloidale sau trapezoidale ale rețelelor de injectat, care să ușureze munca celor ce realizează matite.

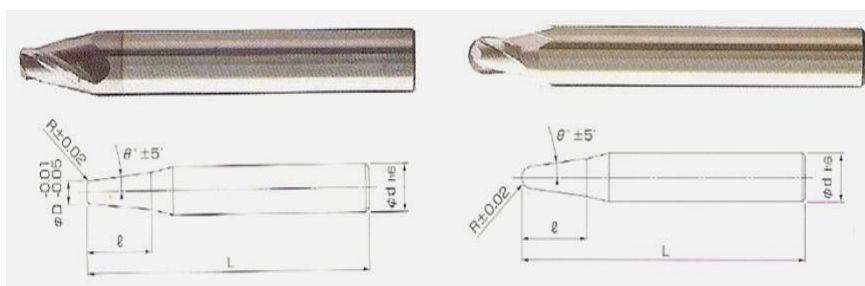


Fig.3.16. Freze specifice realizării rețelelor de injectat [NsTool, 2006]

Figura 3.16 este reprezentativă în acest sens diametrul respectiv unghiul de înclinare având următoarele valori: pentru cele cilindro frontale diametrul cuprins între 2-6mm cu unghiuri de 7°, 10°, 12° și 15° iar pentru cele cu cap sferic diametrul este de 2-6mm iar unghiul de înclinare are valoarea de 10°, 15° și 20°.

Tabel 3.2 [NsTool, 2006]

Tip Freză A* Nr. Dinti	Diam. (D)mm	Lungime de tăiere (l)mm	Unghiul de înclinare al gâtului	Diametrul de prindere (d)mm	Lungimea totală (L)mm	Preț bucată (EUR)
1	0,01	0,01	15°	4	45	300
1	0,02	0,02	15°	4	45	240
1	0,03	0,03	15°	4	45	205
1	0,04	0,04	15°	4	45	172
1	0,05	0,05	15°	4	45	155
Tip Freză B** Nr. Dinti	Diam. (D)mm	Lungime de tăiere (l)mm	Unghiul de înclinare al gâtului	Diametrul de prindere (d)mm	Lungimea totală (L)mm	Preț bucată (EUR)
2	0,03	0,045	15°	4	45	205
2	0,04	0,060	15°	4	45	172
2	0,05	0,075	15°	4	45	155
2	0,06	0,090	15°	4	45	137
2	0,07	0,105	15°	4	45	120
2	0,08	0,120	15°	4	45	103
2	0,09	0,135	15°	4	45	94
<b>*Freză Tip A≈NSME100</b>						
<b>**Freză Tip B≈NSME230</b>						

### 3.2.2. Procedee de prelucrare a microcavităților

În figura 3.17 se prezintă modul de prelucrare al unor cavități prin îndepărtare de material și al unei piese de tip creion precum și modul în care se face numărul de treceri la realizarea unui produs.

Aceste microscule sunt utilizate pe micromașini de găurit sau frezat sau mai bine spus pe mini-centre de prelucrare de frezare-găurire existând firme specializate producătoare în acest sens. Principiul de lucru al acestor mașini este acelaș ca la mașinile clasice sau la CNC-urile actuale cu diferența că totul se realizează în miniatură. De asemenea diferența dintre cele două procese este aceea că piesa rezultată depinde în mare măsură de forța mașinii dar și de faptul că microscula utilizată în proces se poate deforma dacă parametrii de lucru nu sunt respectați astfel obținându-se un produs rebut.

La prelucrarea cu astfel de scule de precizie trebuie să ținem cont de unele aspecte cum ar fi procesul de prelucrare, forțele ce apar la desprinderea materialului, vibrațiile precum și căldura ce se obține în timpul procesului prelucrării.

Dintre procesele micromecanice putem afirma că cel mai utilizat este microfrezarea în scopul obținerii suprafețelor sau pieselor 3D dar aici apar probleme legate de prelucrarea cu scule al căror diametre este sub 1mm sau 0.5mm .

Mașinile simple ce sunt destinate microprelucrărilor mecanice depășesc rar o greutate de 50-70kg cu excepția faptului când acestea sunt centre de prelucrare.

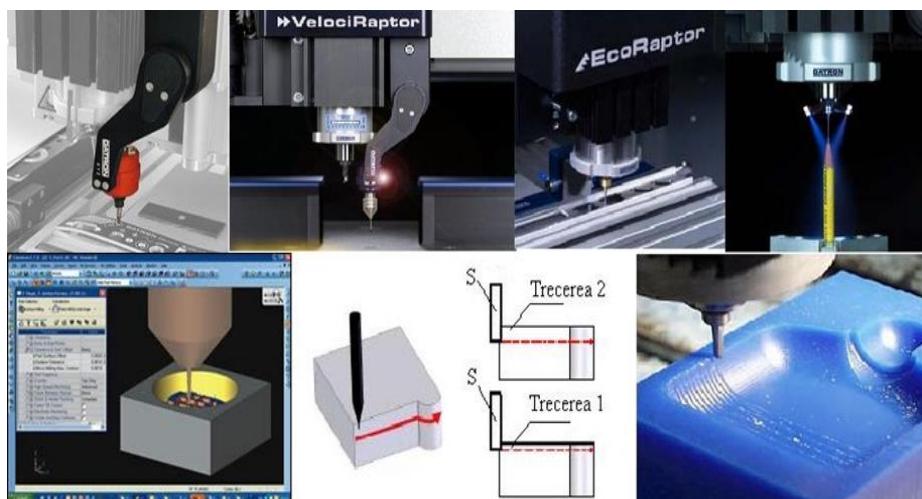


Fig. 3.17 . Tipuri de prelucrări ale microsculelor. [Jung, 2007]

Se cunoaște faptul că, în general trebuie ca scula să fie realizată dintr-un material mai dur sau mai rezistent decât suprafața ce trebuie prelucrată iar raza acesteia trebuie de asemenea să fie mai mică decât raza ce trebuie prelucrată în piesă sau în microcavitate.

Un fapt important de care trebuie să se țină cont la prelucrarea cavităților pentru matrițe îl reprezintă realizarea sculei precum și limitele acesteia. [Ratchev, 2008] Prin urmare parametrii importanți ca viteza de așchiere, avansul de lucru, adâncimea de pătrundere în material și turația arborelui principal, sunt de neglijat. De exemplu centrele cu comandă numerică sunt proiectate să funcționeze la o turație de 5000 până la 80000rot/min. Mașinile specializate în lucru cu scule miniaturale pot să lucreze cu turații de la 40000 la 160000rot/min și chiar mai mari.

Piața oferă astăzi scule de microfrezat de diferite tipuri precum și din diferite materiale iar la efectuarea unei prelucrări schimbarea de sculă poate aduce un dezavantaj realizării piesei dat fiind faptul că punctul inițial al vârfului cutitului nu mai este concludent cu cel anterior. Din nefericire microsculele au o durată de viață

limitată datorită dimensiunilor mici și uzurii sau tensiunilor mari ce apar la contactul brusc cu piesa de prelucrat.

Avantajul procedurii de microfrezare în comparație cu electroeroziunea este acela că scula intră în contact direct cu piesa ceea ce face ca suprafața prelucrată să fie de calitate și să aibă toleranțe foarte mici. Un alt avantaj este posibilitatea prelucrării unor piese de configurație complexă pe mașini în 5 axe și multitudinea de materiale ce pot fi prelucrate. Sculele diamantate sunt utilizate în special în cazul materialelor nemetalice, materialelor plastice și compozite, calitatea optică pentru suprafețele continue sau cele discontinue fiind favorizată de un singur cristal diamantat din vârful sculei.

La nivel comparativ cu frezarea standard, operația de frezare a microcavităților durează mai mult programul CNC fiind dublu sau chiar triplu față de un program normal rulat pe un centru de prelucrare datorită faptului că la dimensiunile frezei adâncimea de pătrundere a acesteia în material este infimă.

### **3.3. Domenii de aplicabilitate a pieselor obținute prin microinjectare.**

Piesele care sunt realizate prin procedeul de microinjectare au cunoscut în ultimii ani o ascendență copleșitoare și sunt utilizate în diverse domenii și în diferite aplicații. Dintre acestea putem aminti micropiese pentru industria aerospațială, industria auto, industria aparatelor și dispozitivelor medicale, biotehnologie [FKHG, 2011], industria aparatelor electronice și electrocasnice, industria chimică și biochimică, industria optică (microscopie, telescoape), aplicații militare, industria telecomunicațiilor (telefoane, calculatoare, stații de emisie recepție), industria jucăriilor, diverse aplicații în știință, industria cosmetică (sticle, capace, dopuri, pulverizatoare s.a), industria tehnologică etc.

#### **3.3.1. Industria automotive**

În general în industria auto găsim microcomponente în cazul echipamentelor de bord cum ar fi diverse tipuri de butoane, manete, mânere, clapete, indicatoare, roțițe, ace de bord, blocatoare, micropompe, precum și elemente de tip semnalizare de diferite culori. În figura 3.18 pot fi observate câteva aplicații respectiv accesorii sau ansamble pe care le găsim în cadrul industriei auto obținute prin procedeul de microinjectare.



Fig. 3.18. Piese și accesorii din industria auto [FKHG, 2011]



Piesele utilizate în industria auto trebuie să se încadreze în standardele de calitate cerute și să aibă proprietăți mecanice, fizice, chimice și de rezistență corespunzătoare pentru aplicația pentru care au fost realizate. În zilele noastre majoritatea firmelor producătoare de autovehicule doresc crearea unor produse cât mai robuste și cu dimensiuni cât mai mici.

### 3.3.2. Industria aerospațială/aeronautică

În domeniul aerospațial sau aeronautic piesele de configurație mică sunt utilizate în principal în cazul tablourilor de comandă sau de bord, plăcilor electronice și componentelor care sunt pe acestea, ansamblor ce sunt puse în mișcare, cu precădere în special la componente ale rachetelor, sateliților și avioanelor.

În figura 3.19 sunt prezentate câteva aplicații ale microcomponentelor care pot fi găsite în industria aerospațială. Prin urmare în figură se prezintă un microansamblu de tip elice și comparația acestuia cu o monedă respectiv o serie de micropiese utilizate pentru tabloul de comandă precum și amplasamentul acestora în ansamblul tabloului de comandă sau bordului aeronavei. Conform figurii ne putem da seama de dimensiunile mici ale unor astfel de piese utilizate în industria aerospațială obținute prin procedeul de microinjectare.



Fig. 3.19. Piese microinjectate folosite în industria aerospațială [Kruse, 2011]

Componentele realizate pentru industria aerospațială trebuie să fie durabile, de o înaltă calitate și stabilitate, rezistente la temperaturi și condiții extreme. De aceea se vor utiliza materialele ce au fost testate inițial pe simulatoare și au trecut testele ale căror proprietăți să corespundă cu cele enumerate anterior. Acest fenomen reprezintă de fapt, o expertiză pe care o realizează/fac inginerii specializați în microinjectarea pieselor pentru industria aerospațială.

### 3.3.3. Industria electronică

În industria electronică materialele polimerice sunt utilizate datorită unor proprietăți bune de izolatori. Dacă se dorește ca materialul termoplastic să aibă bune proprietăți de conductibilitate în acesta se introduc particule foarte fine de oțel ce au dimensiuni cuprinse între 8-10  $\mu\text{m}$  [Erhard, 2006]

Industria electronică este bogată din punct de vedere al micropieselor existente pe această piață, majoritatea microcomponentelor și a microsistemelor existente găsindu-și o însemnătate multiplă în electronică. În primul rând aceste

pieșe sunt utilizate ca și componente pentru calculatoare, telefoane mobile sau fixe, televizoare, antene, videorecordere, CD/DVD-playere, radiouri, casetofoane, electrocasnice sau pieșe integrate în circuitele și plăcile electronice.

În figura 3.20 sunt prezentate câteva exemple de cabluri și mufe injectate utilizate în industria electronică la realizarea transferului de date între calculator și perifericele acestuia sau între alte componente electronice. Se poate observa analogia realizată în figură între plăcuțele electronice inițiale și după ce au fost "îmbrăcate" cu materialul termoplastic.

Aceeaș figură prezintă pieșe de tipul conectorilor sau micropompe prevăzute cu valve multiple obținute prin procedeul de microinjectare. Ultimile imagini ale figurii reprezintă o serie de valve și pompe speciale utilizate în diverse domenii obținute prin microinjectare realizate de firma Furon. Valvele realizate de această firmă au fost concepute și realizate pentru atingerea unor performanțe optime cu un cost scăzut și o capacitate de funcționare îndelungată. Se poate deduce din figură ca acestea sunt transparente iar una dintre avantajele ar fi că aceste pieșe au proprietăți bidirecționale la utilizare. Pompa arătată în primul plan este realizată din PTFE și temperatura lichidului suportată în exploatare poate ajunge la 100°C.



Fig. 3.20. Cabluri mufate, conectori, micropompe și valve utilizate în electronică [BMB,2003]

Dintre aplicațiile electronice nu pot lipsi micropiese utilizate în cadrul funcționării plăcilor pentru calculatoare adică plăci de bază, plăci video, plăci de sunet etc. Figura 3.21 prezintă o multitudine de asemenea tipuri de componente care se atașează la plăcile electronice menționate anterior precum și pieșe de încapsulare a semiconductorilor (nu se obțin prin microinjectare ci prin procedeul de litografiere) sau alte tipuri de pieșe specifice industriei electronice realizate prin microinjectare.



Din nou se prezintă o comparație între piesele miniaturale și o monedă. În contextul în care se afirmă faptul că industria electronică prezintă o plajă largă de aplicații în figură se pot observa câteva micropiese realizate pentru aparatele foto sau pentru compact discuri (playere) precum și componente specifice aparatelor electrocasnice.

Datorită diversității și multitudinii de aplicații ale acestui domeniu putem afirma că acest domeniu nu este nici pe departe unul acoperit în totalitate ci reprezintă unul dintre acelea de cercetare continuă și inovare.

Printre aplicațiile frecvente ce impun materiale termoplastice în domeniul electronic amintim:

- încapsularea semiconducătorilor. Materialul uzual este rășina epoxidică și metoda preferată este injectarea prin transfer. S-a estimat că în anul 1980 producția acestor piese încapsulate a depășit 10 miliarde de unități.
- fabricarea de semiconducători folosind tehnica de litografiere care implică degradarea selectivă a rășinilor reticulare de polimeri cu etapele asociate de gravură și pasivarea substraturilor folosind acoperiri de protecție sau rezistență.
- componente de circuit integrat pentru bordul autovehiculelor, amortizoare de vibrații și fotorezistoare.[Brydson, 1999]

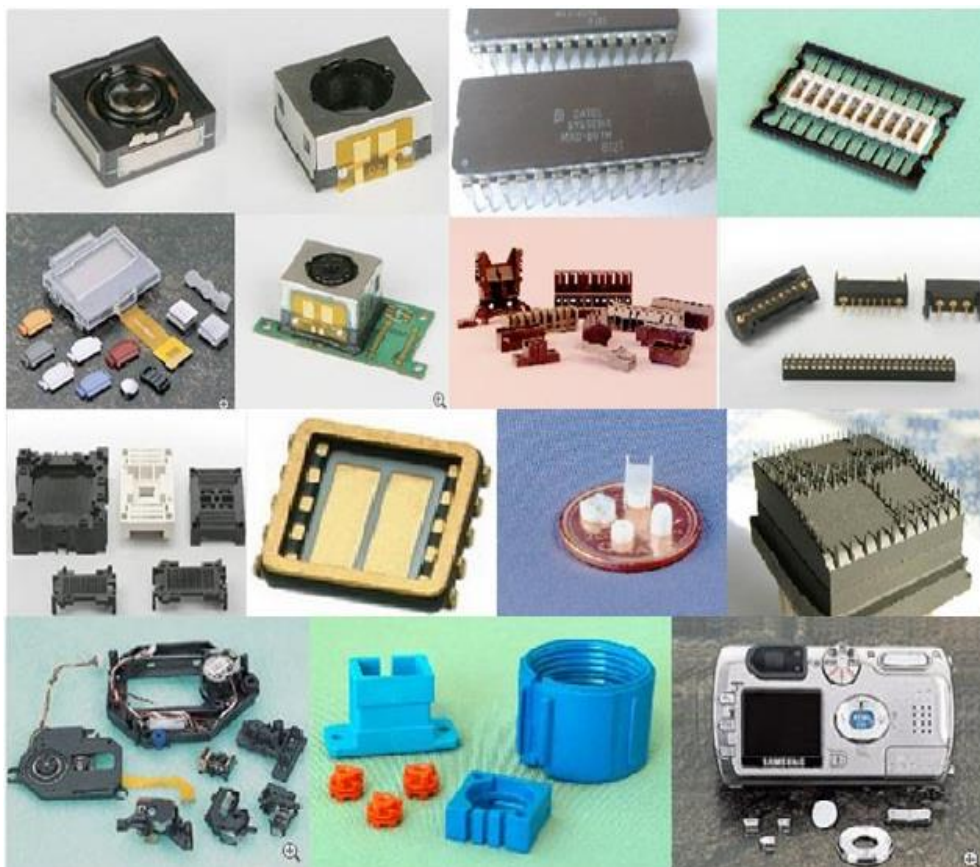


Fig. 3.21. Microcomponente electronice și electrocasnice  
[M.I.Tech, 2007], [BMB, 2003], [FKHG, 2011], [Kruse, 2011]

### 3.3.4. Industria Militară

Tehnica militară și tehnologia în acest domeniu reprezintă una dintre piețele cu aplicabilitatea cea mai diversificată în ceea ce privește produsele obținute prin procedeul de microinjectare.



Fig. 3.22. Componente miniaturale utilizate în industria militară [BMB, 2003]

Analizând aparatele de zbor și cele maritime putem afirma că micropiese sunt utilizate continuu în cazul mașinilor de război, la panourile de control sau comandă și nu numai. Micropiese sunt utilizate într-o formă electronică elegantă destinate unor plăci electronice speciale precum plăci de ghidare după sursa de căldură sau după un obiect în mișcare (microcipuri de ghidare pentru rachetele utilizate de avioanele de luptă, microcipuri utilizate de bateriile antiaeriene, microcipuri utilizate de detectoarele radar, microcipuri din telefonii mobilă etc).

Este cunoscut faptul că aceste piese trebuie să aibă anumite proprietăți specifice și să reziste în condiții extreme de utilizare pentru scopul pentru care au fost create. În figura 3.22 sunt prezentate câteva din aplicațiile pieselor microinjectate utilizate în cadrul industriei militare.

### 3.3.5. Industria optică

În acest sens majoritatea aparatelor optice cum ar fi microscopul, telescopul, binoclul etc au în componența lor piese miniaturale. Cercetări aprofundate s-au făcut pentru a se reduce dimensiunile lentilelor utilizate în optică în special în domeniul armatei pentru centrele specializate de observare. De asemenea în medicină pentru microscopul și alte aparate medicale optice sunt realizate micropiese și microcomponente.

Alte cercetări în domeniul opticii s-au axat pe transmiterea informației, în prezent asistăm la un "război informațional" creat la scară mondială. Astfel de cercetări au avut loc în privința transmiterii informației prin intermediul fibrelor optice iar în electronică stocarea unor baze de date se realizează pe unități de memorie cum ar fi Hard Disk-urile. Desigur că de aici ajungem și la produsele prin intermediul cărora se realizează scrierea pe unitățile de stocare a informației cum ar fi diskete, CD-uri, DVD-uri, Blue-ray discuri etc. De regulă aceste tipuri de piese sunt realizate din policarbonat. [Erhard, 2006] Figura 3.23 prezintă fotografiile unor microlentile din sticlă prima fiind partea de reflexie iar apoi partea de transmitere a luminii urmând o placă de microlentile convexe multistrat pentru transmiterea luminii și secțiunea prin una dintre acestea.

În optică microlentilele utilizate sunt împărțite în general în microlentile pozitive (convexe), negative (concave), difractive, reflexive, sferice, respectiv asferice. Dimensiunile pe care aceste lentile le pot atinge sunt cuprinse între 10 μm și 2 mm referindu-ne în special la piesele utilizate în microoptică, piese obținute prin procedeul de microinjectare. De asemenea figura prezintă microlentile ce se

utilizează în cazul microscopelor, telescoapelor, aparatelor foto, LCD-uri [Kim, 2007] și aparatelor ce folosesc raze infraroșii realizate de firme cum ar fi SUSS MicroOptics, Teledyne, Heptagon etc. Chiar dacă microlentilele au diverse aplicații specifice în domeniul opticii, s-au mai realizat cercetări privind imprimarea sau scrierea pe CD-uri sau DVD-uri precum și pe alte unități optice.

Figura 3.23 prezintă modul în care s-a imprimat acea suprafață unde se stochează informația pe unitatea optică marită la microscop de unde vom constata că distanțele dintre acele punți observate în imagine este de ordinul micronilor respectiv o simulare realizată într-un program specific unităților de stocare a informațiilor.

Figura este reprezentativă pentru a se observă diferența de scriere care există între un CD respectiv un DVD.

Astfel distanța dintre layerele paralele în cazul unui CD este de  $1,6 \mu m$  comparativ cu  $0,74 \mu m$  la un DVD iar dimensiunea minimă de pe suprafața de stocare a unui CD e de  $0.83 \mu m$  comparabil cu  $0.4 \mu m$  în cazul unui DVD.

DVD-urile prezintă 0.6mm grosime și conțin cavități, unde se imprimă informația dorită, cavități care au o lățime de 320nm și o adâncime de 120nm.

Aceste reperate sunt injectate de regulă în mai puțin de 5s iar evacuarea acestora din matriță trebuie să se realizeze fără ca piesa să fie tensionată motiv pentru care există la mașinile de injectat extractoare special concepute în acest sens. [Harper, 2006]

Pentru reperatele de tip CD/DVD ciclul de injectare este scurt deoarece acele extractoare ale pieselor sunt de fapt niște un braț ce prezintă ventuze cu aer destinate lipirii pe partea nescrisă a reperelor în vederea evacuării acestora din matriță. Cu ajutorul unui senzor se realizează apoi o desprindere a reperului de pe acest braț cu ventuze prin intermediul aerului comprimat.

Mașinile de injectat astfel de reperate sunt mașini speciale iar pe acestea nu se pot integra alt tip de matrițe decât dacă acestea sunt tot pentru acest tip de injectare. O asemenea matriță de injectat CD/DVD-uri este relativ scumpă deoarece acele mici cavități care se obțin în urma injectării și care există pe poansonul matriței sunt realizate prin procedee speciale și cu cost ridicat.

Microinjectarea este considerată a fi un procedeu destinat pieselor miniaturale dar piesele precum CD uri, DVD-uri sunt realizate la scară microscopică diferența față de piesele convenționale din injectarea standard fiind că prezintă detalii structurale ce sunt încadrate în gama micrometrilor. [Wintermantel, 2009]

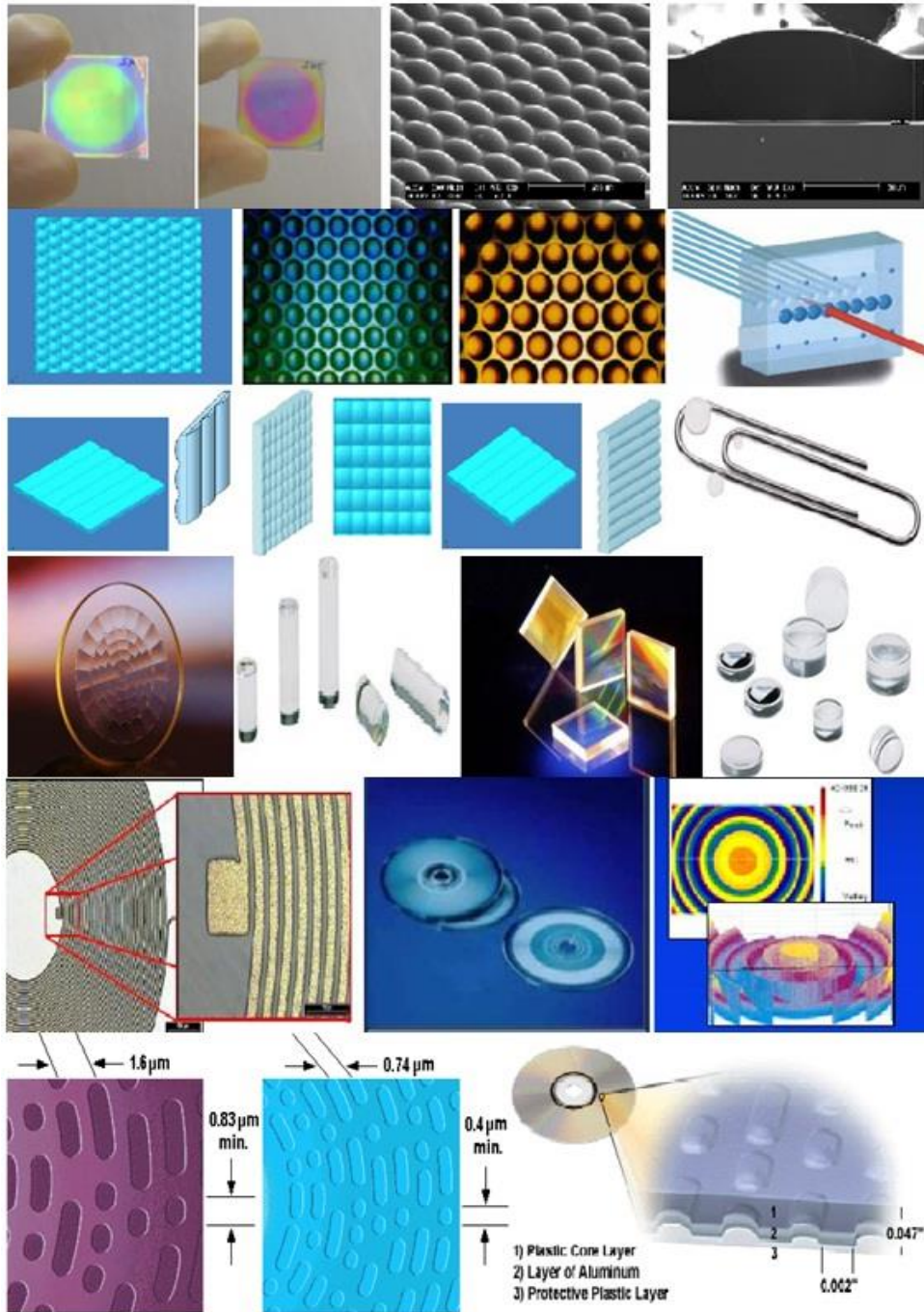


Fig. 3.23. Tipuri de microlentile și imprimarea/scrierea realizată pe CD și DVD  
[Kim, 2007], [Hsu, 2011], [Foley, 2001]



### 3.3.6. Industria Medicală

În industria aparatelor și dispozitivelor medicale micropiese ce sunt obținute prin procedeul de microinjectare au o multitudine de aplicații cum sunt cele redate în figura 3.24. Din aceasta se pot observa piese sau componente specifice instrumentelor medicale de tip seringi, ace, cleme, piese pentru implanturi, micropompe, micropipete, furtune etc.



Fig.3.24. Aplicații diverse în industria medicală [BMB, 2003], [Demag, 2011], [FKHG, 2011], [Kruse, 2011], [SEMOFS, 2010]

Materialele din care sunt fabricate aceste microcomponente sunt alese de regulă de o calitate superioară fie rigide fie flexibile, este obligatoriu să poată fi sterilizate, proprietățile acestora fiind de asemenea ridicate. Din figură se observă comparația realizată între piesele obținute prin microinjectare și măciucia unui băț de chibrit.

Din imaginile prezentate în figură se poate trage concluzia că aceste micropiese au caracter utilizabil practic pentru scopurile pentru care au fost create iar dimensiunile mici și complexitatea reperelor au o precizie demnă de apreciat.

Una dintre imaginile din figură reprezintă o micropipetă a cărei diametru este  $100\mu\text{m}$  iar alte figuri sugerează micropompe dotate cu microvalve, micropiese pentru înțepat sau mecanisme pentru transmiterea microfluidelor prin microtuburi.

De asemenea pot fi observate diverse piese la care le este prezentată greutatea constatând că aceasta nu depășește un gram. Chiar dacă piesele au dimensiuni mici, o configurație complexă și greutate redusă acesta reprezintă motivul pentru care aceste repere sunt utilizate cu succes în aplicațiile medicale.

Microcomponentele pe care le găsim în general în industria și în dispozitivele medicale sunt de obicei transparente și proiectate să reziste la presiuni ridicate și căldură dat fiind faptul că se utilizează pentru aplicații în biologie sau pentru transmiterea fluidelor în biochimie și în interiorul laboratoarelor de cercetare cu scopul modificării de ADN pe animale, plante sau oameni. Dintre elementele ce au ca scop transmiterea fluidelor de la respectiv înspre pacienți figura 3.24 prezintă o serie de tuburi de diverse dimensiuni, ventuze sau furtunuri.

### 3.3.7. Industria recreațională/jucăriilor

În acest sens fabricanții de lucruri recreative precum și cei de jucării s-au întrecut în o mare diversitate de idei pentru a menține o piață competițională strânsă și totodată profitabilă.

În cazul jucăriilor de dimensiuni mici putem afirma ca acestea sunt de o diversitate foarte mare întrucât s-au realizat microcomponente sau microansamble care să satisfacă atât gusturile băieților dar și pe cele ale fetițelor. Desigur că pentru aceste jucării ce au componente ce sunt obținute prin procedeul de microinjectare există reguli de utilizare ce vizează doar o anumită vârstă de copii pentru care acestea au fost create (figura 3.25).



Fig.3.25. Micropiese cu aplicații în industria recreațională

### **3.4. Concluzii**

Microinjectarea a luat amploare după anii 90 în SUA și Japonia iar astăzi reprezintă un sector indispensabil al tehnologiei datorită impactului asupra tuturor industriilor cunoscute.

Realizarea pieselor sau reperelor miniaturale prin procedeul de microinjectare se realizează în firme specializate sau în laboratoare singurele constrângeri fiind cele care se referă la geometria sau configurația piesei dorite sau cele ce vizează cerințele clientului.

Una dintre problemele majore ale acestui procedeu îl reprezintă studiul curgerii materialului termoplastic prin microcavități și impactul modificării diversilor parametrii asupra curgerii topiturii de material. Lucrarea de față se axează pe studiul curgerii materialului termoplastic prin rețele și cavități cu aplicare la piese microinjectate și implicit cu pereți subțiri.

Așa cum s-a prezentat în acest capitol posibilitățile de obținere a matrițelor sunt diverse, sculele utilizate sunt diferite, aplicațiile acestor tipuri de piese sunt numeroase iar singura constrângere privind realizarea reperelor specifice diverselor industrii îl reprezintă alegerea tipului de material utilizat dat fiind faptul că nu toate materialele polimerice pot fi procesate prin procedeul de microinjectare.

## Cap. IV – Obiectivul cercetării doctorale.

Pentru majoritatea proceselor de fabricație a produselor din materiale polimerice prin injectarea în matriță s-au realizat cercetări teoretice și experimentale cu caracteristici de aplicabilitate și reproductibilitate foarte bună sau cel puțin satisfăcătoare.

În cazul particular al microinjectării, adică acela al fabricării unor piese cu proprietăți funcționale speciale și de dimensiuni foarte mici, nivelul general de cunoaștere este extrem de redus.

Două aspecte majore determină această situație:

- Dimensiunile reduse implică o abordare specifică, nuanțată a curgerii materialului polimeric prin rețele și în matriță,
- Parametrii tehnologici optimi nu se mai pot asigura decât pe echipamente special construite, dedicate microinjectării.

Aspectele amintite mai sus fac ca producția mondială pentru piese microinjectate deși în creștere accelerată, să fie satisfăcută la ora actuală doar de câteva firme consacrate în special din SUA, Elveția, Germania și Japonia foarte preocupate de altfel pentru păstrarea pozițiilor pe piață și foarte evazive privind tehnologiile asimilate.

Nu există nici o experiență autohtonă în domeniul microinjectării iar implementarea unui asemenea procedeu în România este blocată de lipsa cunoștințelor fundamentale asociată procedurii și mai ales a celor practice, experimentale care ar putea constitui punctul de plecare al realizării unor prime aplicații.

Existența la Universitatea Politehnică din Timișoara a unei posibile baze experimentale adecvate-mașina de injectat KraussMaffei ERD 35B destinată obținerii de CD/DVD-uri, mașina de frezat cu viteze ridicate de prelucrare ISEL Premium.3020 (High Speed Machining), precum și dotările laboratorului de Prototipare Rapidă și a celui de Măsurări Tridimensionale fac posibilă abordarea tehnologiei de microinjectare ca și obiectiv de interes major.

Baza materială anterior menționată se cere completată de un set de cunoștințe speciale privind problemele specifice microinjectării susținută apoi de un set minimal de experimente pentru situații concrete de interes uzual.

În acest context teza de doctorat are ca scop **realizarea unui studiu al curgerii privind topiturile de polimer, prin rețele și cavități cu aplicație la microinjectare**, studiu care se poate realiza cu ajutorul unor programe de simulare specifice din domeniul mecanicii fluidelor cum sunt: Moldflow, Moldex3D, VisiFlow, Simpoe, I-Deas ș.a.

În softurile de simulare a curgerii, în general (aer, apă, lichide diverse) sunt utilizate modele matematice newtoniene sau nonnewtoniene. Astfel sunt softuri care au ca bază modele de tip newtonian ca ecuațiile lui Euler, Lagrange, modelul lui Newton, modelul Bingham, modelul Navier-Stokes pentru fluide compresibile, modelul Hagen-Poiseuille, etc, destinate rezolvării unor probleme din mecanica fluidelor, aeronautică, medicină, industria energetică și altele.

Deoarece în lucrare se vor realiza o serie de simulări cu ajutorul programului Autodesk Moldflow trebuie amintit faptul că cele mai utilizate modele matematice privind simularea curgerii materialului polimeric în software specifice sunt modelul



Poiseuille, modelul Navier-Stokes, modelul Oswald de Waele, modelul Maxwell și modelul Hele-Shaw.

Studiile teoretice privind simularea microinjectării se vor asocia unor cercetări experimentale care să vizeze două aspecte și anume:

- Aspecte tehnologice specifice în realizarea rețelelor și cavităților la microinjectare pe câteva modele referențiale.
- Evaluări preliminare comportării curgerii pentru modele experimentale referențiale în timpul microinjectării

Asocierea studiilor de simulare a curgerii folosind softuri dedicate cu rezultatele cercetărilor experimentale pe modelele referențiale ce permit obținerea unei expertize tehnologice primare care poate fi apoi dezvoltată pe platforma operațională oferită de dotările specifice laboratoarelor de Tehnologia Prelucrării Produselor din materiale polimerice, Prototipare Rapidă și Măsurări Tridimensionale

Realizarea obiectivului cercetărilor doctorale descris mai sus asigură o bază de cunoaștere teoretică și aplicativă importantă pentru studiul și asimilarea unor soluții tehnice cu potențial de implementare industrială în tehnica specifică a microinjectării. Figura 4.1 prezintă o schemă sintetizată a obiectivelor propuse în cercetarea doctorală în raport cu activitățile preconizate pentru atingerea acestora.

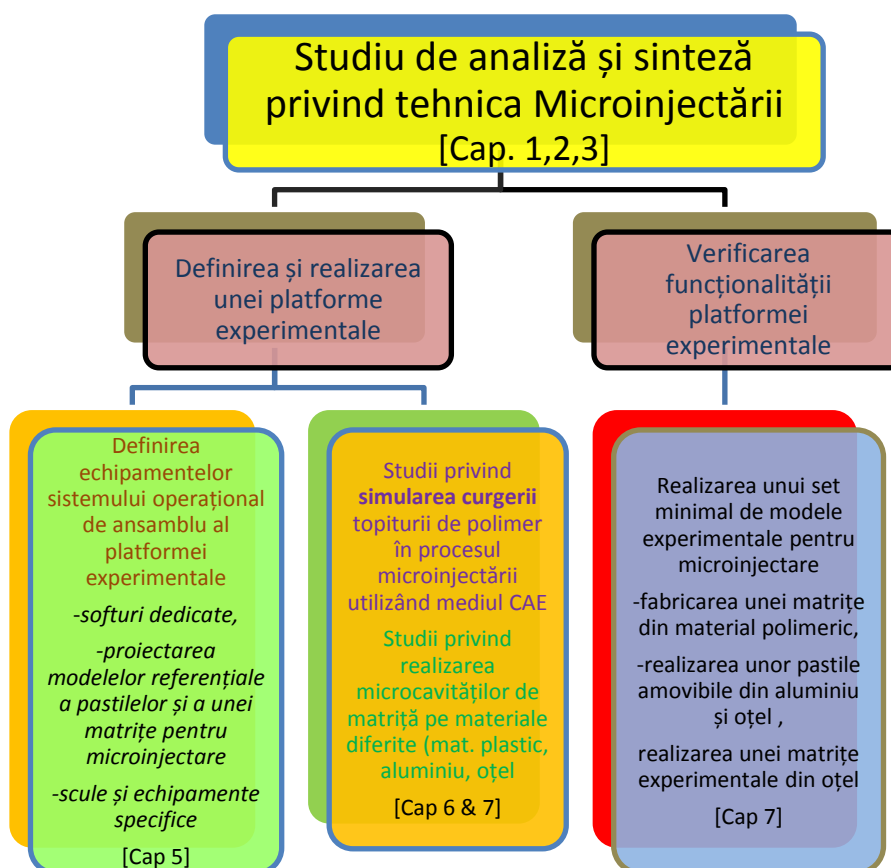


Fig. 4.1. Sinteza obiectivelor cercetării doctorale

## Cap. V – Realizarea unei platforme experimentale pentru microinjectare.

### 5.1. Noțiuni privind concepția unei matrițe.

Proiectarea matrițelor pentru injectarea pieselor din materiale termoplastice se realizează prin parcurgerea succesivă a mai multor faze. Acest proces este în general unul iterativ. Eficiența acestuia depinde în mare măsură de experiența profesională, calitatea materialului documentar și mai nou utilizarea unor programe sau pachete de programe de proiectare asistată de calculator. [Iclănzan, 2006]

Un algoritm de proiectare a matrițelor de injectat poate să se prezinte astfel:

- ◇ studiul preliminar al piesei de injectat;
- ◇ stabilirea planului de separație al matriței;
- ◇ stabilirea procedurii de injectare;
- ◇ evaluarea duratei ciclului;
- ◇ stabilirea numărului de cuiburi și a dispunerii acestora;
- ◇ definirea configurației și dimensiunilor sistemului de injectare;
- ◇ definirea dimensiunilor și tipului de matriță;
- ◇ definirea sistemelor matriței;
- ◇ proiectarea matriței;
- ◇ verificări, execuții și montaj la cuiburi;
- ◇ elaborare instrucțiuni.

În cele ce urmează se va face o prezentare rezumativă a etapelor algoritmului de proiectare cu specificația că pentru aplicarea efectivă a acestuia și eficiența proiectării trebuie să se utilizeze o literatură de specialitate consacrată cum ar fi manualele de proiectare Menges/Mohren sau Gastrow precum și sistemele de construcții tipizate DME, Hasco, Ewikon etc, dublate de propria experiență în producție și tot mai mult de utilizarea calculatorului și a diverselor softuri de aplicație din domeniu.

*Studiul preliminar al piesei de injectat* se realizează în legătură cu forma, dimensiunile și materialul piesei indiferent dacă proiectantul matriței primește un model real sau virtual al piesei de injectat (caz mai rar) fie dacă lui îi revine și misiunea de a concepe această piesă. Acest studiu preliminar este de tip multicriterial și profunzimea lui depinde în mare măsură de experiența profesională a proiectantului. [Iclănzan, 2006]

Forma piesei este un indicator foarte sugestiv privind modul concret de realizare a injectării. Ea se analizează în raport cu utilizarea piesei și cu compatibilitatea relativă dintre utilizări și solicitări. Ea poate de indicații asupra procedurii de injectare realizabil, a punctelor de injectare și planelor de separație acceptabile, a configurației cuiburilor, a modului de evacuare din matriță, a sistemului de răcire utilizabil, a necesității bacurilor, a defectelor previzibile, iar în unele situații chiar și relativ la capacitatea de rezistență a piesei la diferite solicitări.

Dimensiunile piesei sunt relevante pentru precizarea numărului de cuiburi și a dimensiunilor de referință ale matriței. Dimensiunile piesei permit evaluări ale duratei ciclului de lucru, a productivității procedurii, a tipului de mașină de injectat

necesară. Ele sunt determinante în precizarea dimensiunilor finale ale cuiburilor și implică și elemente de dimensionare a traseului de injectare (culee-canal de distribuție-dig). Dimensiunile piesei pot sugera și informații privind rezistența piesei la anumite tipuri de solicitări. [Seres, 1996]

Materialul piesei este important pentru stabilirea parametrilor de proces și în consecință are rol asupra deciziilor privind modul de injectare (capacitate de curgere), a modului de asigurare a răcirii piesei în matriță, a defectelor posibile.

Elementele anterioare se corelează în timpul evaluărilor preliminare cu date impuse de comanda de fabricație (serie, costuri, termene) cu cele legate de calitatea piesei și solicitările instantanee sau de lungă durată impuse piesei.

*Stabilirea planului de separație al matriței* se face în funcție de modul de utilizare al piesei și modul ei de scoatere din matriță. În primul caz este important ca bavurile care ar putea să se producă la nivelul planului de separație să nu creeze dificultăți de funcționalitate a piesei sau zone inestetice, iar în al doilea caz trebuie să se evite o soluție constructivă care ar complica matrița sau ar crește costurile realizării ei. O soluție tehnică care elimină adesea aceste probleme posibile neajunsuri o constituie cea a injectării cu „canale tunel”. [DSM, 2010], [Imold, 2011]

*Stabilirea procedurii de injectare* se face în raport cu condițiile tehnice impuse piesei și caracteristicile utilajului ales respectiv gradul de echipare al acestuia cu dispozitive conexe (duze antiretur, dispozitive de omogenizare, sisteme de plastifiere suplimentară, etc.). Condițiile tehnice impuse piesei sunt hotărâtoare și un rol important revine alegerii aceluși procedeu de injectare care să satisfacă cel mai bine umplerea rapidă și fără defecte a cuiburilor matriței. Injectarea poate să fie directă, punctiformă, peliculară, tip umbrelă, cu canale tunel, cu canale izolate și din ce în ce mai des cu canale încălzite datorită avantajelor tehnice pe care le oferă.

Decizia luată în prima fază a proiectării poate fi schimbată ca urmare a iterațiilor determinate de deciziile din fazele ulterioare ale proiectării.

*Evaluarea preliminară a duratei ciclului.* Ciclul de lucru definitiv al mașinii de injectat se stabilește pe cale experimentală în faza de lansare în fabricație a produsului. Componenta cea mai importantă a ciclului de lucru o reprezintă faza de răcire în matriță care pentru a asigura o productivitate maximă se cere să fie cât mai mică. În faza de proiectare a matriței nu se poate face decât o evaluare aproximativă a duratei ciclului de lucru. Durata completă a unui ciclu de injectare poate fi  $t=20...120$  secunde funcție de volumul de material injectat în cuib, de viteza de injectare și de grosimea pereților piesei (grosime mare a peretelui  $\Leftrightarrow$  timp de răcire mai lung). Pentru acest calcul preliminar se poate aprecia:

- t=20 secunde, pentru piese cu  $V_p < 3 \text{ cm}^3$ ,
- t=40 secunde, pentru piese cu  $V_p = 3...10 \text{ cm}^3$ ,
- t=60 secunde, pentru piese relativ mari,  $V_p = 10...50 \text{ cm}^3$ ,
- t=120 secunde, pentru piese cu  $V_p > 50 \text{ cm}^3$ .

*Stabilirea numărului optim de cuiburi.* Numărul optim de cuiburi se stabilește pe baza unei analize comparative, ținând cont de următorii parametri:

- ◆  $G$ =capacitatea reală de plastifiere a mașinii de injectat,
- ◆  $V_{inj}$ =volumul maxim de material plastifiat necesar la o injectare,
- ◆  $F_i$ =forța maximă de închidere pe care o poate dezvolta utilajul,
- ◆  $A \times B$  = dimensiunile active ale platourilor mașinii de injectat.

a) din condiția de a nu depăși capacitatea de plastifiere a mașinii

$$n_1 = \frac{G \cdot t}{3,6 \cdot m} \quad (5.1)$$

$G$ =capacitatea reală de plastifiere, [kg/h]

$m$  = masa unei piese injectate, [g]  
 $t$  = durata completă a unui ciclu de injectare, [s]  
 Valoarea lui  $\langle\langle m \rangle\rangle$  masa piesei se poate stabili astfel:

$$m = V_p \cdot \rho \cdot k \quad (5.2)$$

$V_p$  = volumul de material necesar realizării unui reper, [cm<sup>3</sup>]  
 $\rho$  = densitatea materialului polimeric, [g/cm<sup>3</sup>]  
 $k$  = coeficient de corecție conform tabelului 5.1:

Tabel 5.1

Masa netă a piesei, [g]	0,3÷0,5	0,5÷1	1÷3	3÷5	5÷10	10÷20	20÷50	>50
Factor de corecție k	1,5	1,4	1,3	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05

b) din condiția de a nu depăși volumul maxim de material  $V_{inj}$ , pe care mașina îl poate transfera în matriță la o injectare

$$n_2 = \frac{V_{inj}}{k \cdot V_p} \quad (5.3)$$

$V_{inj}$  = [cm<sup>3</sup>]  
 $V_p$  = [cm<sup>3</sup>]  
 $k$  = coeficient de corecție

c) din condiția ca forța maximă de închidere  $F_i$ , pe care o poate dezvolta utilajul să nu fie depășită ca valoare de forța generată de presiunea la care materialul plastifiat a umplut cavitatea cuibului (această forță rezultantă indusă de presiunea topiturii de polimer tinde să deschidă matrița)[Stan, 2003]

$$n_3 \leq \frac{F_i}{1,2 \cdot \sum_i p_i \cdot \Delta s_i} \quad \text{sau} \quad n_3 \leq \frac{F_i}{1,2 \cdot p_i \cdot S_C} \quad (5.4)$$

$p_i$  = presiunea topiturii de polimer, în cuib  $p_i = (0,4 \div 0,6) p_{inj}$   
 $p_{inj}$  = presiunea de injectare prescrisă pentru materialul procesat [daN/cm<sup>2</sup>],  
 $S_C$  = suprafața frontală a cuibului, [cm<sup>2</sup>] (sau proiecția cuibului pe planul de separatie)  
 $F_i$  = forța maximă de închidere dezvoltată de mașina de injectare, [daN],

d) din condiția de încadrare a matriței pe suprafața activă a platourilor mașinii

$n_4$  – posibil din dispunerea geometrică a cuiburilor.(fig. 5.1.)  
 Numărul de cuiburi în matriță v-a fi:

$$n = \min(n_1, n_2, n_3, n_4), [-]$$

Observații:

- ◆ Valoarea ce rezultă poate fi redusă dacă seria de fabricație este mică și nu se justifică realizarea unei matrițe cu multe cuiburi, de gabarit mare;
- ◆ Se preferă realizarea de matrițe cu număr par de cuiburi amplasate într-o schemă dublu simetrică;
- ◆ Frecvent proiectantul alege pentru matrița de injectare o variantă

constructivă cu număr redus de cuiburi. Decizia sa este fundamentată de criteriile economice (de analiză a costurilor sau de calitate):

- costuri de bază ale societății (producție, aprovizionare, vânzare,...)
- costuri cu mașina de injectat (amortizare, întreținere, utilități,...)
- costuri cu matrița (proiectare, material, manoperă,...)
- costuri indirecte (montare matriță, probe, întreținere, ...)
- când pretențiile de calitate ale piesei de realizat sunt mari este necesară reducerea numărului de cuiburi, chiar și pentru serii mari de fabricație.

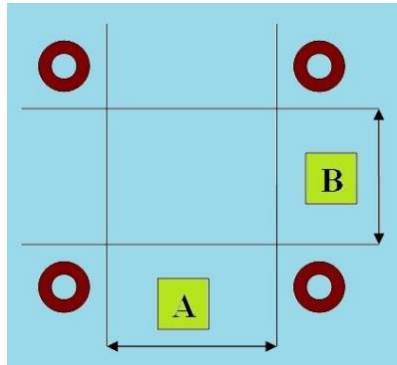


Fig.5.1. Dispunerea cuiburilor matriței

Decizia luată în această fază poate fi schimbată ca urmare a iterațiilor determinate de deciziile din fazele ulterioare.

*Definirea configurației și dimensiunilor sistemului de injectare.* În această fază se definește de fapt configurația și dimensiunile sistemului format de traseul de injectare „culee-rețea-dig-cuib”:

- Diametrul  $d_0$  al duzei de injectare în matriță funcție de masa piesei și tipul de material plastic injectat
- Lungimea culeii corespunzător raportului  $l/d_0=5..9$
- Secțiunea canalelor de distribuție funcție de tipul materialului ( $d_1$ )
- Dimensiunea digului funcție de masa piesei (diametrul  $d_2$  și lungimea  $l_2$ )
- Dimensiunile de execuție ale cuibului funcție de dimensiunile și toleranțele piesei și contracția materialului.

*Definirea dimensiunilor și a tipului de matriță.* Elementele constructive anterior definite permit proiectantului ca în această fază să prefigureze cu suficientă acuratețe tipul matriței și dimensiunile ei de ansamblu. Aceste dimensiuni permit încadrarea matriței într-un sistem referențial de tipizare constructivă. În această fază se face o ultimă verificare a posibilității de montare și bună funcționare pe utilajul ales.[Iclanzan, 2006]

*Definirea sistemelor conexe.* În această etapă pe baza dimensiunilor de referință și a elementelor constructive anterior precizate se fac definiții privind tipul și caracteristicile următoarelor elemente constructiv-funcționale:

- ❖ soluția constructivă de aerisire a cuiburilor;
- ❖ sistemul de canale pentru realizarea răcirii („temperării”) cuiburilor;
- ❖ soluția constructivă de evacuare a piesei din matriță;
- ❖ soluția constructivă a sistemului cu canale calde și dimensionarea

acestui.

Pentru toate elementele mai sus menționate există o vastă literatură de specialitate care prezintă numeroase soluții alternative.

*Proiectarea finală a matriței* presupune din această fază utilizarea extensivă a softurilor de aplicație disponibile pentru construcția ansamblului și a detaliilor (CAD) inclusiv a documentației de execuție (CAM). Aceasta se bazează pe folosirea cataloagelor de tipizate de matrițe realizate de diferite firme consacrate (DME, Hasco, Ewikon, Rabourdin etc).

### **5.1.1. Elemente componente principale ale unei matrițe.**

În cazul matrițelor pentru microinjectare cel mai important lucru în componența unei matrițe îl reprezintă pastilele și realizarea acestora. Pastilele includ zona activă a cuiburilor dar adesea și rețeaua de injectare.

În principiu, dacă cavitatea și poansonul matriței sunt realizate conform desenelor de execuție fără a fi dezaxate nu ar trebui să existe probleme în momentul în care se realizează injectarea iar piesele rezultate ar trebui să fie în cotele prescrise și fără defecte. Desigur că aceste pastile trebuie concepute și proiectate cu foarte mare grijă deoarece dacă piesa este complicată și planul de separație ales este complex se poate întâmpla să obținem o piesă care să nu corespundă cu desenul de execuție. Mai exact piesa poate fi dezaxată ceea ce poate să aibă influențe negative asupra produsului, sau se poate întâmpla ca pereții piesei să nu corespundă cu ceea ce a fost proiectat adică să existe o diferență de grosime între aceștia care să fie neconcludentă. Aceste neajunsuri ar putea duce în cel mai bun caz doar la refacerea pastilelor destinate cavității respectiv poansonului iar în cazul cel mai puțin dorit la refacerea întregii matrițe.

Plăcile matriței sunt alte componente principale nelipsite din concepția unei matrițe. Fie că este vorba de plăci de prindere sau de plăci de formare sau chiar de plăci aruncătoare și portaruncătoare unul din elementele esențiale de care trebuie să ținem seama este paralelismul acestora. În cazul matrițelor convenționale nu există probleme de acest gen deoarece astăzi plăcile sunt standardizate și sunt comandate la firme specializate, calitatea acestora fiind indiscutabilă. În acest caz producătorul de matrițe trebuie doar să prelucreze plăcile respective la cotele la care este nevoie nemaifiind necesare alte cheltuieli cu achiziționare semifabricat, tăiere și aducere la cota la care o au plăcile în cauză. În cazul procedurii de microinjectare plăcile nu sunt standard încă și trebuiesc prelucrate ceea ce face ca procesul să nu fie unul simplu ci unul complex. Un alt factor de care trebuie să se țină seama este că plăcile de prindere trebuie să fie astfel concepute încât să poată fi montate cu ușurință pe platoul mașinii de injectat fie el fix sau mobil.

Duza matriței trebuie astfel concepută sau aleasă încât să poată intra în contact cu plăcile matriței prin intermediul unui ajustaj cu strângere astfel încât să nu existe pericolul ca materialul topit să ajungă între duză respectiv plăci și să nu ajungă în canalele de distribuție respectiv în cavități.

Coloanele matriței trebuie să îndeplinească o serie de proprietăți și ele pot fi prelucrate în întregime sau pot fi achiziționate ca elemente standardizate. De asemenea în acest caz nu putem vorbi de coloane standardizate și ele trebuiesc a fi realizate în cadrul Universității/laboratorului sau a unei firme.

Alte elemente principale cum sunt bușe, bolțuri, distanțieri, tije aruncătoare etc trebuiesc realizate în laborator sau la o sculărie în cazul microinjectării și nu pot fi achiziționate ca elemente standardizate. Acesta reprezintă unul dintre neajunsurile procedurii, că inginerul sau cercetătorul în acest domeniu este nevoit să conceapă și/sau chiar să realizeze matrița în întregul ei ansamblu.

Elementele de genul șuruburilor, șaibelor etc pot fi achiziționate din comerț desigur în funcție de găurile filetate și tipul acestora realizate în plăcile matriței.

### **5.1.2. Factori ce influențează concepția matrițelor.**

În concepția unei matrițe proiectantul trebuie să țină seama de o serie de factori. În primul rând principalul factor care poate influența concepția unei matrițe îl reprezintă designul piesei, mărimea acesteia precum și scopul pentru care a fost creată, adică ce fel de proprietăți i se impun la funcționare. În cazul în care piesa este simplă și nu are nevoie de găuri laterale construcția matriței este simplă și nu este nevoie să se utilizeze concepția de matriță cu bacuri care este mai costisitoare și mai complexă. Dacă piesa prezintă găuri pe părțile laterale proiectantul v-a opta pentru această soluție cu bacuri respectiv bolțuri.

Un alt factor care poate să influențeze concepția și realizarea matriței îl reprezintă platoul mașinii după care sunt alese sau realizate plăcile de prindere ale matriței și nu în ultimul rând alegerea numărului de cuiburi din matriță. Numărul de cuiburi ales trebuie să fie în concordanță cu capacitatea mașinii adică volumul de material posibil injectabil și nu poate să depășească acest volum prescris.

Procedeele de injectare ales reprezintă un alt factor de care trebuie să ținem seama în concepția matrițelor deoarece la majoritatea procedeelor de obținere a pieselor din materiale plastice matrițele sunt diferite de exemplu la piese obținute prin termoformare, prin rototranslație, prin injectarea prin compresiune sau prin injectarea de tip sandwich etc.

## **5.2. Proiectarea matrițelor în medii CAD.**

Proiectarea este un fenomen nelipsit din munca tuturor inginerilor din majoritatea domeniilor cunoscute. Proiectarea reprezintă în procesul tehnologic de fabricație al unui produs circa 80% din totalul procesului restul fiind prelucrarea acestuia. În cazul matrițelor proiectarea trebuie să se realizeze fără deficiențe deoarece o matriță realizată incorect reprezintă un timp de lucru îndelungat și o pierdere considerabilă pentru firma în cauză. Dacă până acum cațiva ani proiectarea se realiza cu hârtia și creionul în zilele noastre ea a evoluat și se face cu ajutorul unor softuri specializate în mediul CAD (Computer Aided Design).

CAD-ul utilizează matematica și procesarea grafică cu ajutorul puterii de calcul a calculatorului în vederea întrajutorării inginerilor în crearea, modificarea, analiza și vizualizarea unor reperi [Kutz, 1998], matrițe, roboți, automobile etc.

Dintre programele CAD cu ajutorul cărora se obțin modele grafice sau reperi de diverse forme amintim: AutoCad, Unigraphics, CATIA, Pro/Engineer, SolidWorks, SolidEdge etc.

### **5.2.1. Proiectarea clasică**

*Proiectarea clasică* reprezintă cel mai vechi tip de proiectare în care inginerul era nevoit să se documenteze, să se folosească de experiența acumulată și să realizeze „ceva” adică un produs, o piesă pornind de la zero. Acest lucru poartă denumirea de inovație și se realizează destul de greu luând în considerare faptul că piesa care se dorește a fi realizată face parte dintr-un ansamblu, este atașată la o altă piesă sau este cuplată la un alt ansamblu.

În cazul proiectării matrițelor în medii CAD prin metoda clasică trebuie să luăm în considerare câteva aspecte privind acest proces:

- se proiectează piesa ce se dorește a fi obținută;
- se alege planul de separație al matriței;
- se stabilește numărul de cuiburi și dispunerea acestora în matriță;
- se proiectează sistemul de injectare al matriței precum și alegerea digurilor pentru piesele proiectate;
- se proiectează pastilele matriței ținându-se cont de contracția materialului piesei;
- se proiectează plăcile matriței începând cu cele de formare în funcție de dimensiunile cuiburilor, apoi cu cele de prindere, intermediare și respectiv plăcile distanțiere.
- se proiectează coloanele și bușele pentru matriță;
- se proiectează sistemul de aruncare (placa aruncătoare, portaruncătoare, aruncătorii, coloanele de ghidare, tijele readucătoare, etc)
- se proiectează duza matriței;
- sunt proiectate alte elemente componente ale matriței (bușe, șuruburi, bolțuri, șaibe...) în cazul în care programul nu posedă aceste elemente tipizate sau standard într-o librerie a programului.
- se realizează desenele 2D ale tuturor subansamblelor amintite anterior cu specificația că acestea trebuie să aibă cote bine definite, vizibile iar toleranțele să fie incluse în treptele de precizie impuse. Pe desene se vor trece diverse informații ajutătoare privind condiții de perpendicularitate, coaxialitate, paralelism, etc.

În urma realizării documentației tehnologice necesare realizării matriței aceasta se printează și sunt trimise la departamentul celor care se ocupă de prelucrare în vederea realizării produselor concepute cu respectarea cotelor din documentație. Se poate observa că proiectarea clasică presupune un timp îndelungat de realizare dacă este să luăm în calcul și modificările ce se fac pe parcurs și costuri relativ ridicate.

### **5.2.2. Proiectarea cu ajutorul elementelor standardizate.**

*Proiectarea cu ajutorul elementelor standardizate* reprezintă un pas important în proiectarea curentă prin ușurarea muncii inginerului din perspectiva proiectării diverselor subansamble. Acest lucru se datorează diverselor firme care se ocupă de tipizate de matrițe și care distribuie matrițe standard „la pachet” în colaborare desigur cu firmele de proiectare de pe piață. Majoritatea programelor de proiectare prezintă o „bibliotecă” sau mai multe în care se găsesc o plajă largă de asemenea tipizate.

Proiectarea matrițelor în CAD cu ajutorul elementelor standardizate este mult mai rapidă și mai eficientă în comparație cu cea prezentată anterior iar fazele acestei metode se succed astfel:

- se proiectează piesa ce se dorește a fi obținută;
- se alege planul de separație al matriței;
- se stabilește numărul de cuiburi și dispunerea acestora în matriță;
- se alege sistemul de injectare al matriței precum și digul specific pentru piesele proiectate din program;
- se generează mărimea dorită a pastilelor matriței ținându-se cont de grosimea plăcilor de formare;
- se generează totalitatea plăcilor matriței și se aleg dimensiunile acestora.



- se aleg din catalog coloanele și bușele pentru matriță la diverse dimensiuni;
- se aleg dimensiunile pentru elementele sistemului de aruncare (placa aruncătoare, placa portaruncătoare, aruncătoarele, coloane de ghidare, tije readucătoare, etc) și se alege o duză standard.
- se aleg din catalog celelalte elemente componente ale matriței cum sunt bușe, șuruburi, bolturi, șaibe, etc, softul generându-le automat la dimensiunile dorite și se încheie întreg ansamblul.
- se realizează desenele 2D ale unor subansamble amintite anterior cu specificația că în cazul tipizatelor acestea sunt gata realizate în librăria programului de proiectare și pot fi descărcate automat doar în cazul în care acest lucru este necesar.

În figura 5.2 se prezintă generarea unui tipizat de matriță mai exact a plăcilor constituente ale acesteia în mediul de proiectare CATIA.

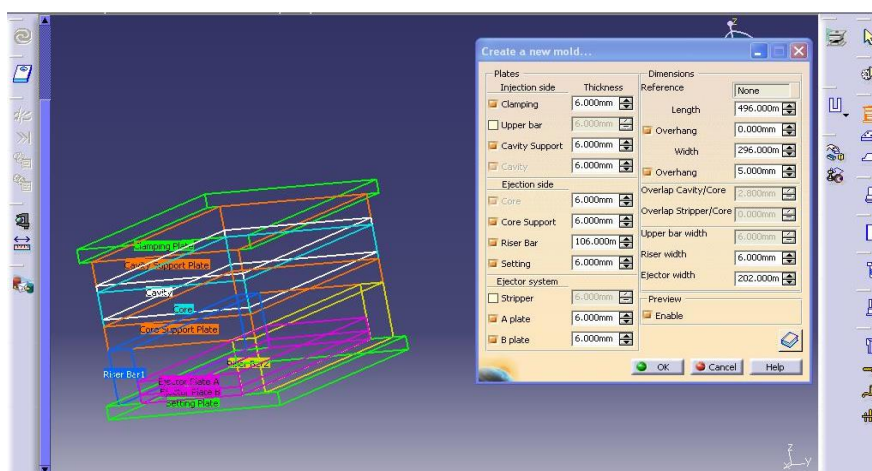


Fig. 5.2. Generare tipizat în CATIA

După dimensionarea plăcilor matriței se vor genera coloanele, bușele, aruncătoarele, șuruburile și celelalte elemente componente care întregesc matrița.

Din cele prezentate anterior se observă că proiectarea cu ajutorul elementelor standardizate în CAD este mai eficientă din punct de vedere al timpului de proiectare precum și al productivității în comparație cu proiectarea clasică.

### 5.3. Concepția și proiectarea unor pastile destinate microinjectării.

Se urmărește realizarea unor tipuri de pastile destinate utilizării pe matrițe pentru microinjectare. Prin urmare în scopul realizării acestui lucru se vor utiliza programele de proiectare existente SolidWorks, Catia, NX etc.

În conformitate cu catalogul firmei Hasco și nu numai în cazul matrițelor destinate microinjectării plăcile componente ale acestora trebuie să fie mai mici decât cea mai mică placă standard cunoscută ce are cote cu valoarea de 156x156mm sau 120x96mm. De aceea aceste tipuri de plăci sunt achiziționate în regimuri speciale la cotele prescrise de cei care doresc să utilizeze astfel de sisteme

și matrițe de dimensiuni mici. Scopul în acest caz îl reprezintă concepția și realizarea unor pastile amovibile destinate procedurii de microinjectare.

Prin prisma faptului că se dorește realizarea unor matrițe destinate sau în scopul cercetării curgerii și pastilele care se concep trebuie gândite în așa fel încât să poată fi schimbate ușor și să fie relativ ușor de realizat. Aceste pastile pot să aibă configurații geometrice diferite pornind de la pătrat, disc, dreptunghiular etc.

Profilul pentru care se optează a fi utilizat în cadrul studiului cercetării este unul de tip dreptunghiular. În figura 5.3 este prezentat un astfel de profil realizat în mediul de proiectare SolidWorks.

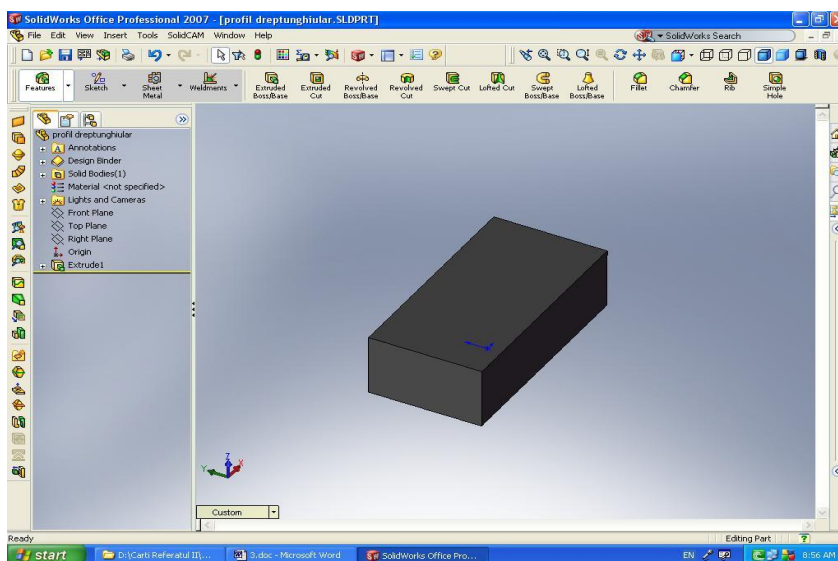


Fig 5.3. Pastilă de tip dreptunghiular.

În componența matrițelor pastilele sunt elemente de mare importanță ele fiind sisteme solicitate permanent în cursul procedurii de injectare și prezentând pericolul unei sensibilități ridicate la lovituri, zgârieturi sau alte elemente ce ar pune în pericol integritatea rețelei sau a cuiburilor.

Prin procedeele de microinjectare sunt realizate piese de configurații diverse mai simple sau mai complicate, de regulă cu pereți subțiri a căror dimensiuni nu depășesc peste mai mari de 10(15)mm lungime și 10(15)mm lățime. De aceea la realizarea pastilelor trebuie să ținem cont de aceste dimensiuni și desigur și de configurația rețelelor sau tipul acestora. Așa cum a fost prezentat în capitolul 2 injectarea poate fi realizată în diverse moduri cu diferite tipuri de diguri. Rețelele de asemenea pot fi amplasate între piese, la exteriorul piesei sau interiorul piesei în cazul injectării cu inel interior. Dimensionarea unor astfel de pastile se realizează în funcție de configurația și dimensiunile piesei dar în acest caz este vorba de tipuri de piese și rețele de injectat miniaturale motiv pentru care dimensiunile pastilelor vor avea dimensiuni reduse. Dimensionarea unei astfel de pastile simple în stare neprelucrată încă poate fi observată în figura 5.4.

Așa cum se prezintă în figura în cauză pastila proiectată are o lungime de 40mm, o lățime de 20mm și o înălțime de 12mm. Desigur că aceste dimensiuni ar putea fi modificate ele având dimensiuni mai mici sau mai mari în funcție de semifabricatele achiziționate în scopul prelucrării acestora.

În stadiul actual pastila nu ar putea să fie amplasată în matriță și de aceea se dorește realizarea unui mod de prindere sau de atașare a acesteia la plăcile de formare ale matriței. Posibilitățile în acest scop sunt nelimitate dar având în vedere faptul că pastilele se vor realiza în scop de cercetare și nu de producție se optează pentru soluții constructive simple și nu pentru soluții complicate. Aceste soluții ar fi realizarea unor frezări laterale la configurația pastilei astfel încât să se obțină proeminențe de tip umăr destinate în primul rând la fixarea lor ușoară pe masa mașinii sau în menghină în vederea realizării rețelelor și pieselor dorite.

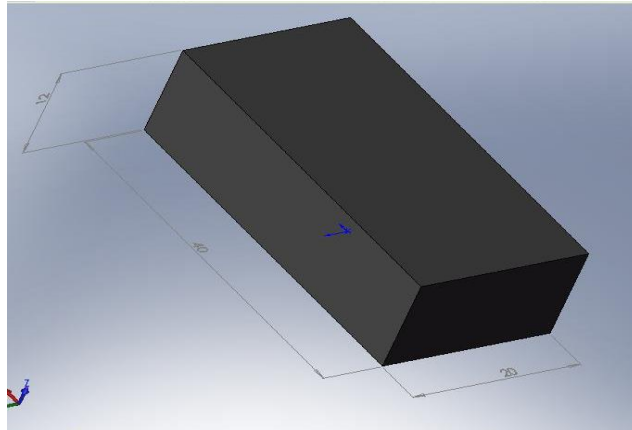


Fig. 5.4. Dimensionarea pastilei.

Prin urmare în urma unor încercări de proiectare s-a decis realizarea a trei tipuri de pastile, tipuri ce pot fi vizualizate în figura 5.5.

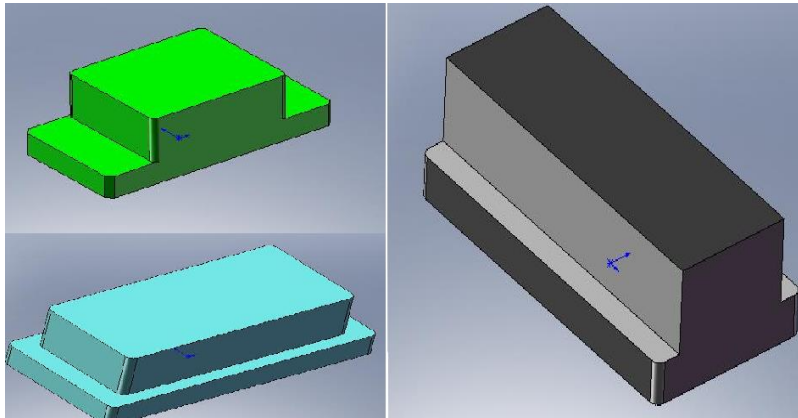


Fig. 5.5. Tipuri de pastile concepute

În urma proiectării celor trei modele se va alege unul singur care va fi modelul de pastilă optim pentru piesele ce se vor concepe respectiv care se vor proiecta. Modelul întâi de pastilă este prezentat simplist în figura 5.5 iar în figura 5.6 sunt prezentate în extenso dimensiunile caracteristice acestuia. Caracteristica principală a acestui tip de pastilă este realizarea buzunarelor care să permită o prindere corespunzătoare a piesei cu bride pe mașina de frezat precum și o fixare

bună a acesteia în plăcile matriței. De asemenea se observă raza realizată în colțurile dreptunghiului mic al pastilei precum și teșiturile realizate la extremitățile dedicate susținerii și fixării pastilei în placa de formare. De cele mai multe ori pastilele cu umăr prezintă o înclinație a pereților de  $1-3^\circ$  pentru ca asamblarea cu placa matriței să se realizeze ușor.

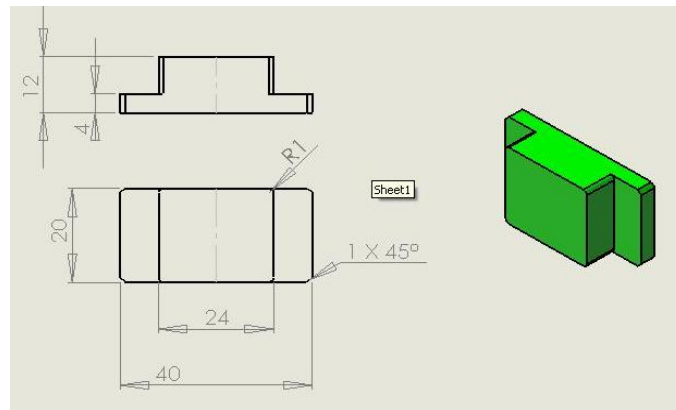


Fig 5.6. Dimensiuni caracteristice modelului I pastilă

Următorul model de pastilă proiectat este redat în figura 5.7 și se observă diferența între cele două modele concepute prin faptul că dacă la primul model realizarea umerilor de sprijin se făcea pe lățimea piesei în acest caz umerii de sprijin sunt realizați pe lungimea piesei pe o adâncime de 8mm și o lățime de 3mm.

Cotele caracteristice acestui tip de pastilă se pot determina foarte ușor din figura de mai jos, avantajul acestei pastile fiind o fixare mai precisă pe placa de formare și un consum de material mai scăzut la prelucrarea acesteia. Și în acest caz prelucrarea se realizează prin procedeul de frezare care se poate realiza pe mașini de frezat clasice sau CNC-uri iar tăierea se poate realiza cu fir.

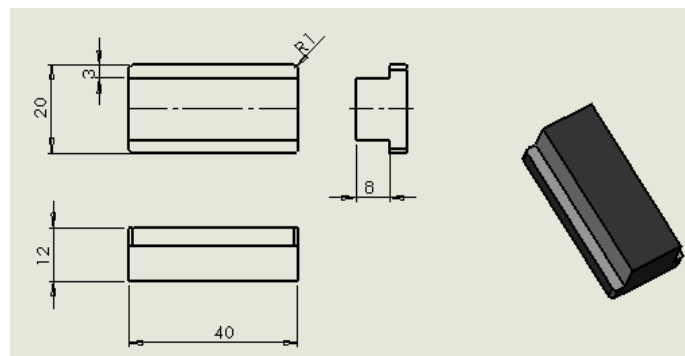


Fig. 5.7. Dimensiuni caracteristice modelului II de pastilă

Modelul III de pastilă proiectat se observă în figura 5.8 iar cotele acestui tip de pastilă de asemenea. Din figură se poate deduce faptul că există o asemănare între pastila de tipul II și aceasta din urmă diferența între ele fiind existența umerilor care existau și la pastila unu concepută. Prin urmare umerii realizați nu există doar pe două laturi ale piesei ci pe toate cele patru.

Umerii realizați pentru această pastilă au dimensiuni variabile pe lungime și pe lățime, fabricarea lor realizându-se prin procedeul de frezare, scopul acestora fiind de fixare pe masa mașinii astfel încât prelucrarea rețelei să se realizeze în condiții cât mai prielnice. De asemenea marele avantaj al acestui tip de pastilă îl reprezintă posibilitatea unei fixări cât mai corespunzătoare pe placa de formare a matriței pentru microinjectat.

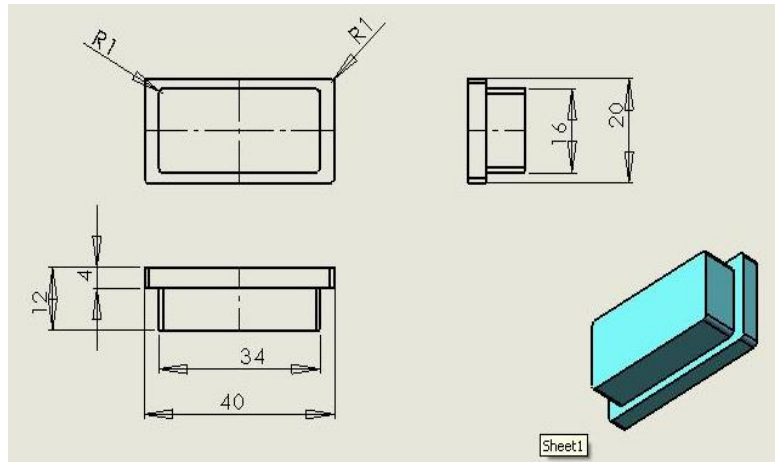


Fig. 5.8. Modelul III de pastilă

Modelul optim de pastilă ales în urma proiectării și analizei îl reprezintă modelul trei conceput și proiectat datorită proprietăților superioare pe care acesta le prezintă la nivel comparativ cu celelalte două inițiale. Desigur că în conceperea diverselor tipuri de rețele de injectat s-au utilizat și pastilele de tipul I și II pentru o analiză comparativă a aranjamentului rețelistic.

#### 5.4. Rețele pentru microinjectare.

În cazul proiectării unor tipuri de rețele trebuie să ținem seama de următoarele aspecte forma rețelei, schema sau configurația rețelei și dimensiunile rețelei. [Goodship, 2004] Mai precis designul unor rețele ar trebui să urmărească aspecte ca umplerea simultană a cavităților, umplerea cavităților cu linii de sudură minime, demulare ușoară a pieselor, neafectarea aspectului estetic al pieselor, secțiunea rețelei să fie considerabilă pentru reducerea unei solidificări premature a materialului injectat și volumul de injectare să fie cât mai mic posibil.

Rețelele utilizate la injectarea pieselor miniaturale pot avea dimensiuni cu mult superioare peste formula  $D_R = 1.5 + S_{max}$ , unde  $D_R$  reprezintă diametrul rețelei iar  $S_{max}$  grosimea maximă de perete a piesei injectate. Se constată că sunt utilizate frecvent rețele de grosimi mari pentru umplerea pieselor miniaturale din considerente de vâscozitate respectiv din considerentul că prin secțiuni mari de rețea curgerea se realizează mult mai simplu decât prin secțiuni mici. Această regulă nu este totdeauna în conformitate cu realitatea deoarece la microinjectare există riscul în cazul materialelor cu vâscozitate ridicată ca topitura să se solidifice prematur datorită trecerii bruște de la o secțiune de perete mare la o secțiune de perete mic.

Secțiunile rețelelor utilizate în industrie sunt așa cum au fost prezentate în subcapitolul 2.5 de formă circulară, trapezoidală, semicirculară și trapezoidal modificat (paraboloid). Se presupune din experimentele realizate în acest domeniu că cele mai bune rezultate de curgere sunt obținute în cazul secțiunilor circulare și paraboloid. Autorul lucrării își propune să realizeze o serie de studii privind curgerea prin rețele de diverse forme de diferite dimensiuni doar în cazul rețelelor cu secțiune de formă circulară, celelalte tipuri amintite fiind *direcții viitoare de cercetare*.

Conform Anexei 3.1 privind lungimea maximă a rețelei de injectat în funcție de diametrul rețelei respectiv de vâscozitatea materialului s-a realizat un tabel de rețele pentru microinjectare ce pornește de la diametrul rețelei de 3mm și ajunge la un diametru de 0.1mm, lungimea maximă calculându-se cu ajutorul unei progresii aritmetice. Rația progresiei utilizată în acest tabel este împărțită astfel: pentru materiale cu vâscozitate scăzută între diametrul 3-0.1mm rația are valoarea de 3,33 iar pentru materialele cu vâscozitate ridicată în cazul aceluiași diametre ale rețelei rația are valoarea de 1.66. Se observă că între cele două rații utilizate există proprietatea că rația pentru o vâscozitate scăzută de material este dublă față de rația utilizată pentru o vâscozitate ridicată, acest aspect fiind pus în evidență și în cazul rețelelor convenționale care se găsesc în Anexa 3.1. Astfel tabelul specific rețelelor pentru microinjectare se prezintă în Anexa 5.1. Figura 5.9. este reprezentativă pentru rețelele de microinjectare realizate pentru materiale cu vâscozitate ridicată.

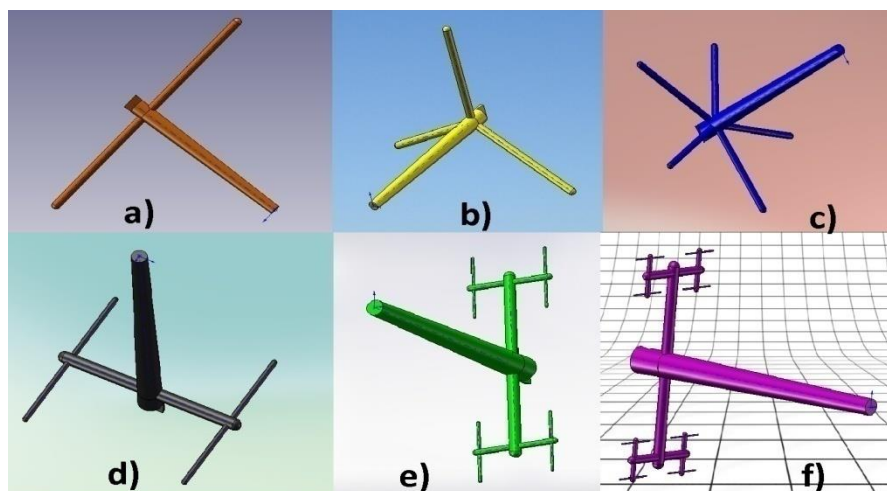


Fig. 5.9. Rețelele materialelor cu vâscozitate ridicată

Rețelele din figura 5.9.a sunt rețele de tip I specifice injectării unei matrițe cu două cuiburi iar acestea sunt reprezentative pentru plaja de diametre cuprinsă între 3-2mm. Rețeaua de tip stea din figura 5.9.b este specifică injectării a trei piese simultan și este reprezentativă pentru un diametru al rețelei cuprins între 1.9mm și 1.5mm. Aceeaș rețea de tip stea se prezintă și în figura 5.9.c aceasta fiind concepută pentru un diametru al rețelei cuprins între 1.4mm și 1mm numărul de piese injectate fiind de 5. În figura 5.9.d este reprezentată o rețea de tip H concepută pentru un diametru al rețelei cuprins între 0.9mm și 0.5mm. Acest tip de rețea este destinat umplerii a patru piese simultan. Rețeaua natural echilibrată destinată umplerii a 8 piese simultan este reprezentativă pentru un diametru al rețelei cuprins în intervalul 0.4-0.3mm și poate fi observată în figura 5.9.e. Ultimul



desen de rețea prezentat în această figură îl reprezintă tot o rețea derivată din cele de tip H ce sunt natural echilibrate a cărei număr de cuiburi este de 16 iar diametru 0.2-0.1mm.

Acest diametru cuprins între 3mm și 0.1mm reprezintă diametrul pe care îl are ultima subrețea sau canal de distribuție aferent rețelei prezentate. Pentru toate aceste rețele se vor realiza simulări de curgere pentru a se observa dacă topitura de material v-a umple rețelele respective la diametrele impuse, subiectul fiind dezbătut pe larg în capitolul șase.

Figura 5.10 prezintă tipurile de rețele concepute pentru materiale cu vâscozitate scăzută. Prin urmare rețeaua din figura 5.10.a este o rețea de tip I pentru a injecta două piese simultan și este reprezentativă pentru un diametru al rețelei cuprins între 3-2.5mm. Specific unui diametru de la 2.4-2mm îl reprezintă rețeaua de tip X concepută injectării a patru piese reprezentată în fig. 5.10.b. În figura 5.10.c se prezintă o rețea de tip stea specifică injectării a șase piese pentru un diametru al rețelei cuprins între 1.9-1.5mm. Acelaș tip de rețea de formă stea este reprezentat în figura 5.10.d și este reprezentativă pentru injectarea a 10 piese simultan având o plajă de diametre al rețelei cuprins între 1.5mm și 1.1mm. Aceaș rețea de tip stea dar de această dată cu o posibilitate de injectare de 18 piese se prezintă în figura 5.10.e pentru un diametru al rețelei de 1mm. În figura 5.10.f se prezintă o rețea de tip X combinată care este concepută pentru diametre cuprinse între 0.9mm și 0.5mm. Acest tip de rețea este destinat umplerii a opt piese simultan. Rețeaua de tip stea ramificată destinată umplerii a 12 piese simultan este reprezentativă pentru un diametru al rețelei cuprins în intervalul 0.4-0.3mm și este reprezentată în figura 5.10.g. Ultimul desen de tip de rețea prezentat în figură îl reprezintă tot o rețea de tip stea concepută pentru un diametru de 0.2-0.1mm care prezintă nu mai puțin de 20 de cuiburi.

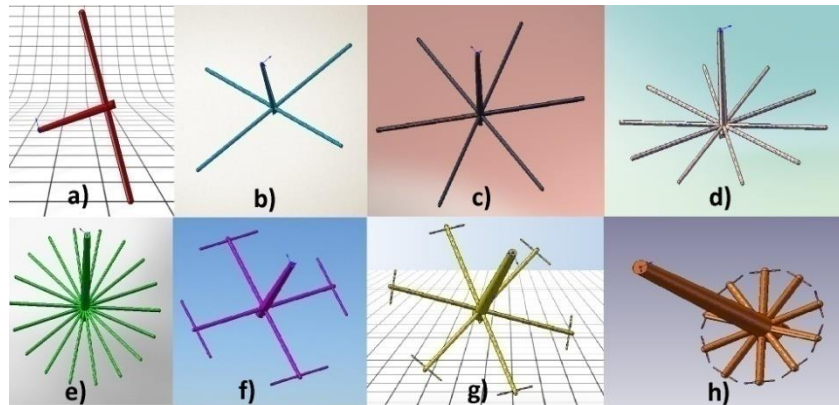


Fig. 5.10. Rețelele materialelor cu vâscozitate scăzută.

Există posibilitatea ca diverse persoane din industrie sau din cercetare să nu fie de acord cu diametre de rețele sub 0.5mm datorită proprietăților reologice ale materialelor termoplastice, dar în cadrul cercetării doctorale am hotărât să realizăm încercări și pentru acest interval de valori limită tocmai pentru a observa dacă se vor obține numai rezultate negative în acest sens. Decizia de a utiliza astfel de dimensiuni limită privind rețelele a fost întărită de o serie de lucrări și cercetări ce au fost realizate de japonezi care au descoperit că limita unui dig pentru injectare este de  $10\ \mu\text{m}$ . Sub această limită descoperită se pare că este foarte greu ca

materialul să mai curgă datorită faptului că legăturile interatomice devin instabile ceea ce duce la o solidificare prematură.

În figura 5.11 sunt prezentate o serie de rețele concepute pentru primul model de pastilă destinat matriței pentru microinjectare. Pentru acest tip de pastilă din primele imagini se poate observa o rețea de tip X ce se poate realiza prin procedeul de frezare cu freză cilindro-frontală în primul caz sau cu freză cu cap sferic în celălalt caz. Pentru ambele variante realizate gaura centrală are un diametru de 3mm și o adâncime de 5mm, canalul de distribuție principal are 2mm lățime și o adâncime de 3mm iar canalul de distribuție secundar o lățime de 1 mm și o adâncime de 1.5mm. În cazul canalului de distribuție principal distanța între axe este de 20mm axa canalelor secundare fiind la 9mm față de origine. Canalele de distribuție secundare au o distanță între axe de 6mm. Imaginea trei din figură prezintă o rețea în forma literei Z. Pastila prezintă o gaură centrală cu un diametru de 3mm și o adâncime de 5mm, canalul de distribuție principal având o adâncime de 2mm și o lățime tot de 2mm cu o distanță între axe de 18mm. Subrețeaua are o adâncime și o lățime de 1mm și o lungime de 14mm.

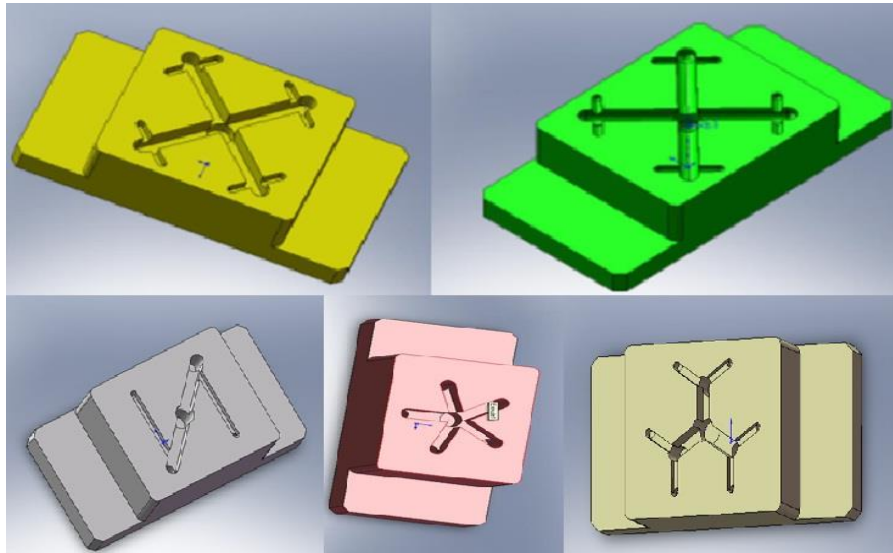


Fig. 5.11. Rețele concepute pentru modelul I de pastilă

În imaginea patru a figurii 5.11 se poate observa realizarea unei rețele de tip stea cu cinci brațe adică pentru a injecta simultan 5 repere. Pastila prezintă o gaură centrală de 3mm diametru cu o adâncime de 4mm, canalul de distribuție fiind unul singur și are o lățime și o adâncime de 2mm. Canalele de distribuție formează între ele un unghi de  $72^\circ$  iar fiecare braț al rețelei are o lungime de 9mm. Tot un tip de rețea în stea dar ramificată prezintă ultima imagine a figurii în cauză. Aceasta a fost concepută să realizeze o umplere de șase repere simultan, canalul de distribuție principal având o adâncime de 2mm și o lățime de 3mm iar cele secundare au o lățime și o adâncime de 1mm. Lungimea canalelor de distribuție principale este de 7mm, a canalelor de distribuție secundare de 5mm iar unghiul dintre cele trei canale principale de distribuție ale rețelei este de  $120^\circ$  și este egal cu unghiul format între canalul de distribuție principal și canalele de distribuție secundare.



Rețelele concepute pentru pastila de tip II sunt redată în figura 5.12 și sunt în număr de cinci. Prima rețea în acest sens o reprezintă cea de forma literei I care are o lățime și o adâncime a canalului principal de 2mm, lungimea acestuia fiind de 30mm. Canalul de distribuție secundar are o lățime și o adâncime de 1mm lungimea totală a acestuia fiind de 24mm. Un alt tip de rețea pentru această pastilă poate fi observat în imaginea a doua a figurii și are forma literei S. Canalul principal al rețelei are o lățime de 2mm și o adâncime de 2.5mm iar canalele secundare ale acesteia au o adâncime și o lățime de 1mm. Imaginea trei a figurii prezintă o altă rețea concepută pentru acest tip de pastilă care are forma literei H și care este realizată pentru a umple simultan opt cuiburi. Rețeaua prezintă trei canale de distribuție dintre care două sunt secundare iar unul este principal, acesta din urmă având un diametru de 3mm pe o adâncime de 2,5mm cu o lungime totală de 30 de mm, iar canalele de distribuție secundare au o lățime de 2mm și o adâncime de 1mm lungimea totală a acestuia fiind 12mm. Între centrul canalelor de distribuție secundare prime există o lungime de 24mm. Canalul doi de distribuție se găsește poziționat pe o axă paralelă cu axa longitudinală (canalul de distribuție principal) a pastilei la o distanță de 6mm de aceasta având o lățime de 1mm și o adâncime de 0.5mm precum și o lungime de 12mm.

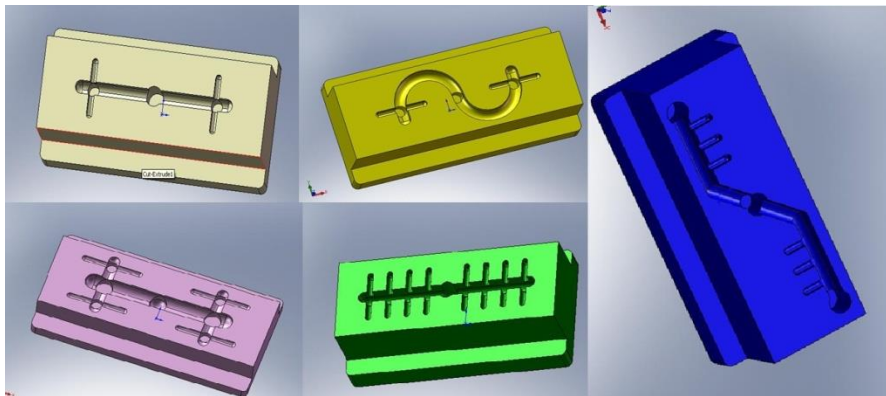


Fig. 5.12. Rețele concepute pentru modelul II de pastilă

În imaginea patru a figurii 5.12 se prezintă un model de rețea de tip neechilibrat conceput pentru un număr de 16 cuiburi. Canalul de distribuție principal al rețelei are o lățime de 2mm o adâncime de 3mm și o lungime totală de 30mm. Canalele de distribuție secundare au lungimea totală de 10mm, o adâncime de 1.5mm, lățimea de 1mm iar distanța între axele acestora respectiv centrul piesei are valoarea de 3.5mm. Ultima rețea concepută pentru acest tip de pastilă este prezentată în ultima imagine a figurii având forma literei Z și fiind concepută pentru șase piese. Pastila prezintă o gaură centrală de 3mm diametru pe adâncimea de 5mm. De asemenea pe pastilă se mai găsesc două găuri de diametrul 3mm pe adâncimea de 4mm dispuse la periferia canalului de distribuție principal. Axele acestor găuri realizate în scopul acumulării de material topit sunt poziționate la o distanță de 4.5mm în funcție de axa longitudinală a pastilei iar în funcție de axa transversală a acesteia poziționarea lor este la 16.5mm. Canalul de distribuție principal are forma literei Z adâncimea și lățimea acestuia având valoarea de 2mm. Unghiul la care s-a realizat înclinația părții centrale a literei are valoarea de 45 deg iar lungimea unei laturi a lui Z are valoarea de 12mm. Canalele de distribuție secundare ce au o lățime de 1mm și o adâncime cu aceeași valoare. Lungimea

fiecărui canal este de 3.5mm distanța între acestea este de 3mm iar distanța din centrul pastilei până la axa primului canal de distribuție secundar are valoarea de 7.5mm.

Pentru modelul trei de pastilă s-au conceput și proiectat o serie de rețele caracteristice care sunt prezentate în figura 5.13. Primul tip de rețea conceput pentru acest model de pastilă este prezentat în prima imagine a figurii și este asemănător literei I având un canal de distribuție principal și două canale de distribuție secundare fiind menit să injecteze patru repere simultan. Canalul de distribuție principal are o lățime și o adâncime de 3mm și o lungime maximă 29mm. Prima subrețea a fost realizată la o distanță de 12mm față de centrul piesei având o lungime totală de 26mm, iar lățimea și adâncimea acestuia este de 2mm. Canalul de distribuție secundar sau subrețeaua doi ar putea fi considerată un dig chiar acesta având o lungime de 4mm lățimea și adâncimea fiind de 1mm.

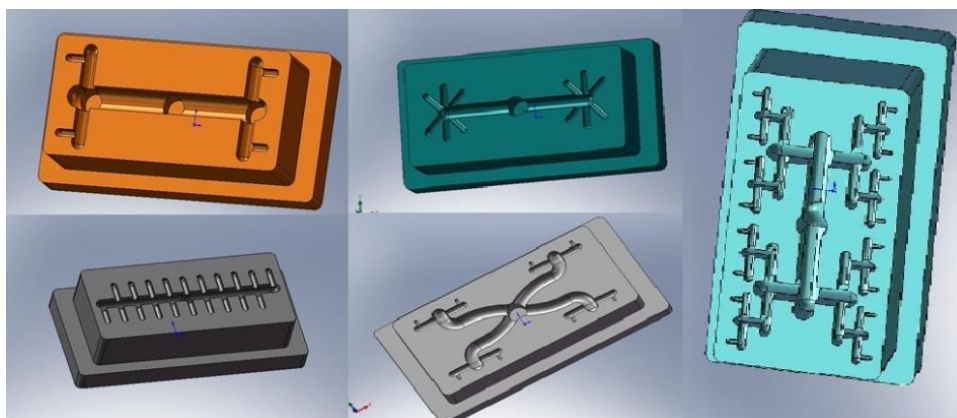


Fig. 5.13. Rețele concepute pentru modelul III de pastilă

Rețeaua din imaginea a doua a figurii reprezintă o rețea în formă de stea ce este destinată umplerii simultane a 12 repere și care este realizată din două canale de distribuție, unul principal și celălalt secundar. Canalul de distribuție principal are o lățime de 2mm și o adâncime cu aceeași valoare, lungimea acestuia fiind de 26mm iar canalul de distribuție secundar îl reprezintă canalul sub formă de stea și are o adâncime și o lățime de 1mm lungimea acestuia fiind de 10mm. Imaginea trei a figurii 5.13 prezintă rețeaua trei concepută care este caracterizată prin faptul că are două canale de distribuție (principal și secundar) și un număr de 20 de piese de injectat. Canalul de distribuție principal al rețelei are o lățime și o adâncime de 2mm lungimea totală a acestuia având o valoare de 30mm. Toate canalele de distribuție secundare au o adâncime și o lățime de 1mm, lungimea acestora fiind de 5mm iar distanța între acestea are valoarea de 3mm. Următoarea rețea concepută poate fi vizualizată în penultima imagine a figurii în cauză și prezintă un canal de distribuție principal și două secundare având o configurație mai complexă în comparație cu cele prezentate anterior. Rețeaua este destinată umplerii simultane a opt piese și are un canal de distribuție principal cu o lățime și o adâncime de 2mm. Primul canal de distribuție secundar are lățimea și adâncimea de 1mm lungimea totală a acestuia fiind 10mm. Următorul canal de distribuție are o lățime și o adâncime de 0.5mm precum și o lungime de 1.5mm. Distanța dintre cele două canale secundare de distribuție care pot fi considerate diguri are valoarea de 7mm. Ultima rețea concepută pentru acest tip de pastilă se prezintă în ultima imagine a figurii 5.13

fiind o rețea de tip echilibrat ce este concepută pentru injectarea a 16 reperi. Canalele de distribuție sunt în număr de șase dintre care două principale și patru secundare. Canalul de distribuție principal unu are o lățime de 2mm, o lungime de 22mm și o adâncime de 4mm. Canalul principal de distribuție doi are lățimea de 2mm, adâncimea de 3mm și lungimea de 12mm. Mijlocul canalului de distribuție doi este dispus la 9.5mm în funcție de centrul piesei. Primul canal de distribuție secundar are o adâncime de 2mm, o lățime de 1mm și o lungime de 12mm. Următorul canal de distribuție secundar are o lățime de 1mm, o adâncime de 2mm și o lungime de 4mm. Canalul de distribuție III secundar are o lungime de 7,6mm, lățimea acestuia fiind de 0.8mm iar adâncimea de 1mm. Ultimul canal de distribuție secundar poate fi considerat a fi un dig datorită dimensiunilor mici de care dispune. Astfel lungimea acestuia este de 1.25mm, lățimea și adâncimea având aceeași valoare de 0.5mm.

### 5.5. Proiectarea unor modele referențiale.

La realizarea unor piese pentru microinjectare și chiar cu pereți subțiri trebuie să se ia în considerare tipul de material utilizat, grosimea de perete a piesei, realizarea rețelei de injectare și alegerea unui dig corespunzător precum și amplasarea acestuia, un tip de ventilație realizat corespunzător precum și alte caracteristici care să ofere o curgere uniformă a materialului în matrită. O importanță deosebită se acordă toleranțelor prescrise în desenul de execuție.

Dacă în urmă cu 10 anii injectarea cu pereți subțiri însemna piese cu o grosime de perete de 2,5mm cu o toleranță de 0.05mm, astăzi injectarea cu pereți subțiri se referă la grosimi de perete de 0,5mm sau sub 1mm cu o toleranță de 10 micrometri. Referindu-ne la diverse reperi realizate prin procedeul de microinjectare vom constata că există piese care pot avea structuri, suprafețe sau toleranțe cu valori la micron. [Rosato, 2000] Dintre materialele uzuale folosite la obținerea unor piese cu pereți subțiri amintim: PC, poliamida, PC/ABS etc. [Moalli, 2001]

Figura 5.14. prezintă trei modele proiectate de industrie vestimentară în speță un nasture în imaginea întâi, o piesă utilizată ca atașament la role, clăpări sau încălțăminte de trekking respectiv în ultima imagine a figurii un toc de pantof.

Modelul de tip nasture prezintă o greutate de 0.02grame având un diametru exterior cu valoarea de 6mm, diametrul interior al reperului fiind de 2mm și grosimea de 1mm. Reperul destinat atașării diverselor tipuri de încălțăminte specializată are o greutate de 0,04g, o lățime și o înălțime a bazei mici de 2mm, o lățime de 3mm și o înălțime de 4,5mm a bazei și o lungime a reperului de 5mm.

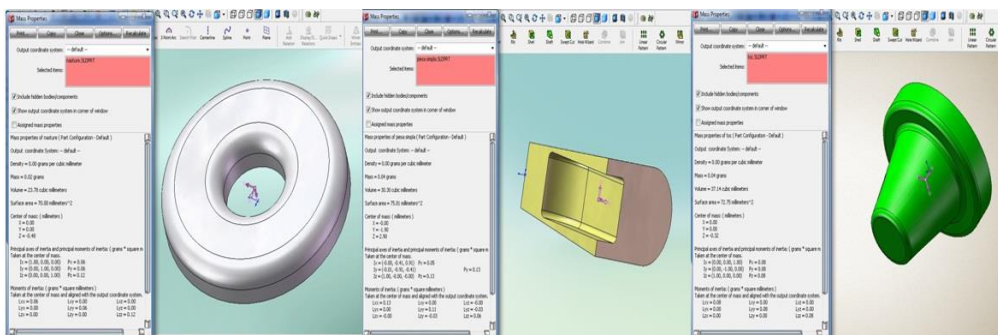


Fig. 5.14. Piese destinate articolelor de îmbrăcăminte și încălțăminte

Tocul prezent în imaginea trei a figurii 5.14 este destinat încălțămintei utilizate de sexul feminin fiind aplicat diverselor tipuri de pantofi sau sandale. Greutatea acestei piese este de 0.04g cu un diametru minim de 2mm și un diametru maxim de 5mm, lungimea piesei având valoarea de 4mm. Umărul reperului are 1mm grosime piesa având o înclinație a peretelui mare de 5° iar razele pe care aceasta le prezintă sunt realizate la 0,2mm.

O altă serie de piese sau modele proiectate o reprezintă cele destinate industriei auto, militare sau aeronautice evidențiate în figura 5.15. Astfel primul model din figură este un banal buton care se poate găsi pe bordul diverselor automobile, nave, avioane etc care are o greutate de 0,05g o lungime de totală de 3.5mm cu un umăr ce are valoarea de 0,8mm. Diametrul maxim al acestui reper este de 5.5mm, cel mediu este de 4.5mm iar diametrul minim este de 2mm. Conicitatea prezentă are valoarea de 15°. Următorul model referențial al figurii îl reprezintă o carcasă, o colivie sau un locaș în care se v-a implementa un buton de tip dreptunghiular ce prezintă un umăr, butonul având proprietatea de comandă. Carcasa prezintă două piciorușe destinate asamblării cu un alt subansamblu în urma atașării butonului respectiv. Aceasta are o greutate de 0.22g cu o lungime de 12mm, o lățime de 9.5mm incluzând piciorușele respective care au o lungime de 2mm și o înălțime și lățime de 1.5mm. Porțiunea de trecere între piciorușe și reperul mare este de 0.5mm iar grosimea de perete a piesei este de 2mm.

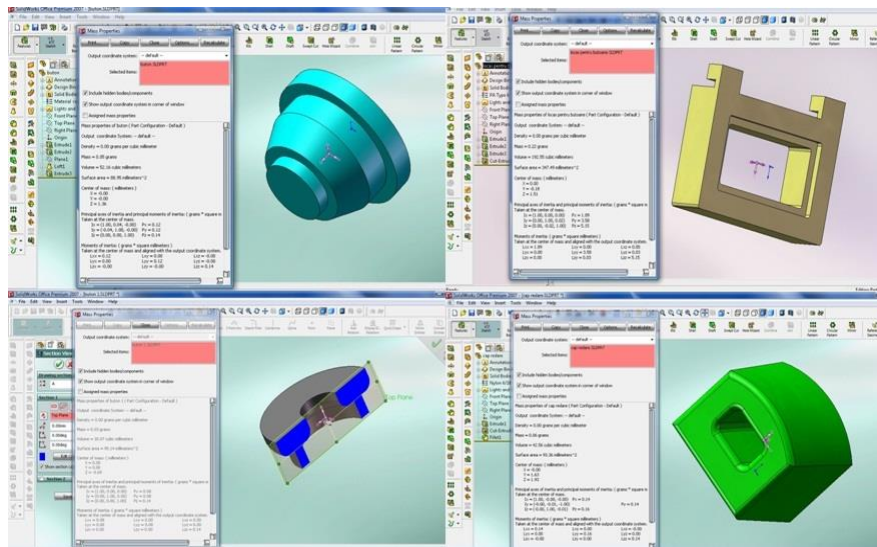


Fig. 5.15. Modele proiectate pentru industria auto

Modelul trei al figurii prezintă tot un buton la fel ca în primul caz dar cu configurație diferită, greutatea acestuia fiind de 0.03g. Butonul are un diametru minim de 2mm urmat de un diametru intermediar de 3.5mm și un diametru maxim de 6mm. Piesa măsoară 2mm în înălțime și prezintă două raze de 0.5mm cu o înălțime a piciorului de 1mm. Ultimul model al figurii îl reprezintă un cap de redare pentru un casetofon auto și nu numai care probabil ar fi trebuit să fie adăugat la piesele destinate industriei electronice. Acest reper are o greutate de 0.06g cu o lungime de 4mm și o lățime de 3mm. Piesa prezintă o înclinație de 3° și o gaură dreptunghiulară centrală de 1mm lățime și 1.6mm lungime destinată fixării reperului în ansamblu cu ajutorul unei cleme.



Datorită faptului că s-a dorit o diversificare a cercetării curgerii materialului polimeric în cavități pe cazuri sau modele referențiale care să vizeze industria au fost proiectate în acest sens și piese din industria IT. Prin urmare în figura 5.16 se prezintă o serie de patru modele de piese utilizate în această industrie, mai exact un fixator de diodă, un element elastic și două plăcuțe utilizate în cazul procesoarelor de calculator și nu numai.

Fixatorul de diodă prezintă o greutate de 0,11g având o lungime de 12mm, o lățime de 8mm respectiv o grosime de perete de 0.8mm pe placa mare și 1mm la proeminențele reperului. Fixatorul prezintă o gaură cu un diametru de 5mm și o serie de reze de racordare la 0.2mm. O altă piesă concepută pentru industria IT o reprezintă un element elastic a cărui greutate este de 0.01g, grosimea de perete fiind de 0.5mm, lățimea de 0.8mm ce are o deschizătură respectiv o înălțime de 7mm. Piesa prezintă și două elemente de fixare sub forma unor sfere a căror diametre nu depășește 1.2mm.

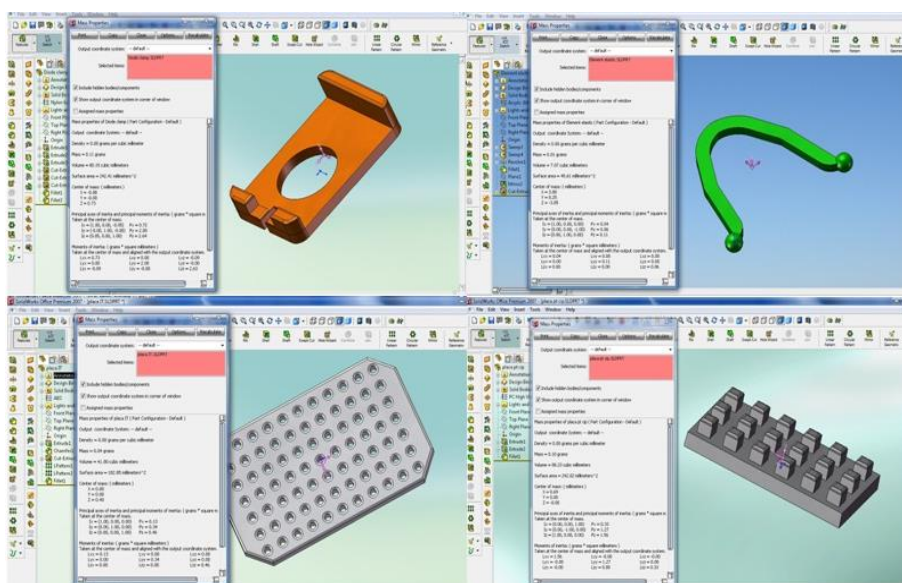


Fig. 5.16. Modele de piese din industria IT

Prima plăcuță concepută și destinată industriei electronice are o grosime de perete de 0.8mm, o greutate de 0.04grame, o lungime de 10mm și o lățime de 8mm. Aceasta prezintă o serie de 77 de găuri de 0.3mm situate la 0.8mm distanță dispuse radial. Ultima imagine a figurii prezintă tot o placă din industria electronică care nu mai prezintă găuri ci mici proeminențe care se vor asambla cu plăci de genul celor cu găuri. Reperul respectiv are 0.1g, o lungime de 10mm, o lățime de 5mm, o grosime de perete de 1mm și un număr de 18 proeminențe a căror înălțime au valoarea de 1mm.

Pentru industria mecanică s-au proiectat o serie de modele diferite pentru care se dorește realizarea unor simulări de curgere pentru materiale cu vâscozitate diferită. Astfel în prima imagine a figurii 5.17 se prezintă o piesă de tip cep a cărei greutate este de 0.06g, ce are o adâncime de 3.5mm, diametrul mare al piesei având valoarea de 6mm, diametrul mic 2mm iar distanța între brațele de fixare de 8mm. Cutia prezentată în imaginea a doua a figurii are o greutate de 0.24grame, o

grosime de perete de 1.2mm, o lungime și o lățime a piesei de 8mm. În următoarea imagine a figurii 5.17 se prezintă o carcasă de reductor care prezintă o greutate de 0.76g, o lungime totală de 28mm și o lățime de 12mm. Grosimea de perete constantă a piesei este de 1mm iar în zona centrală a piesei grosimea de perete maximă a piesei atinge valoarea de 2,2mm. Un alt model proiectat pentru industria mecanică îl reprezintă roțița prezentată în imaginea patru a figurii a cărei greutate este de 0.05grame. Reperul are un diametru exterior de 12mm, un diametru interior cu valoarea de 4mm, o grosime de 0.8mm și o înălțime de 2mm a dinților. Suportul de prindere existent în imaginea cinci a figurii 5.17 are o greutate de 0.02g, o lungime de 7mm a piesei, o lățime de 3mm și o înălțime de 2.2mm. Grosimea de perete a piesei este de 0.5mm. Găurile pe care le prezintă reperul au un diametru de 1.5mm și o înălțime ce are aceeași valoare.

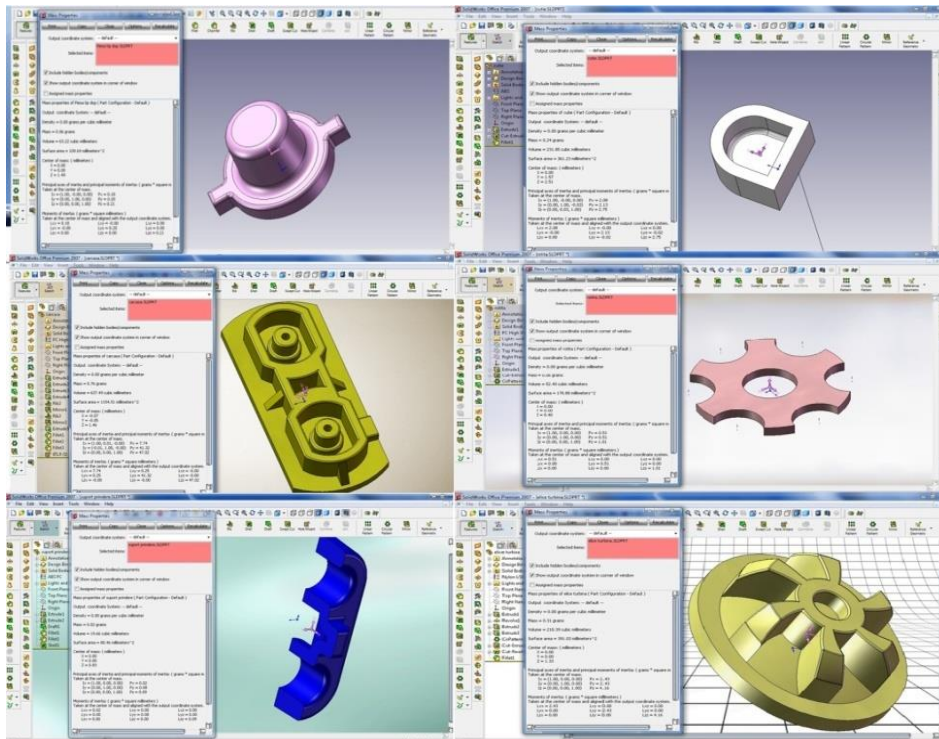


Fig.5.17. Piese din industria mecanică

Ultima imagine a figurii 5.17 prezintă o elice pentru o turbină ce are o greutate de 0.31grame, un diametru exterior de 12mm, un diametru interior de 2mm, o grosime de perete de 1mm și o înălțime a piesei de 4mm. Elicele reperului au o înălțime de 2.5mm, o lățime minimă de 0.67mm și o lățime maximă de 1.65mm.

Pentru majoritatea acestor modele referențiale de piese proiectate vor fi realizate simulări de curgere cu materiale de vâscozitate diferită pentru a observa care dintre materialele utilizate vor umple cel mai rapid piesele respectiv dacă acestea vor prezenta linii de sudură sau goluri de aer.

Simulările respective vor avea un caracter de cercetare în sensul că pentru început se vor realiza simulări pe un singur reper urmând ca apoi simularea să aibă

caracter de punere în practică pentru o matriță cu 2, 4 sau mai multe cuiburi utilizând rețele destinate microinjectării. În acest sens figura 5.18 prezintă o serie de repere din cele concepute și proiectate cu rețeaua de injectare destinate studiului curgerii materialului polimeric.

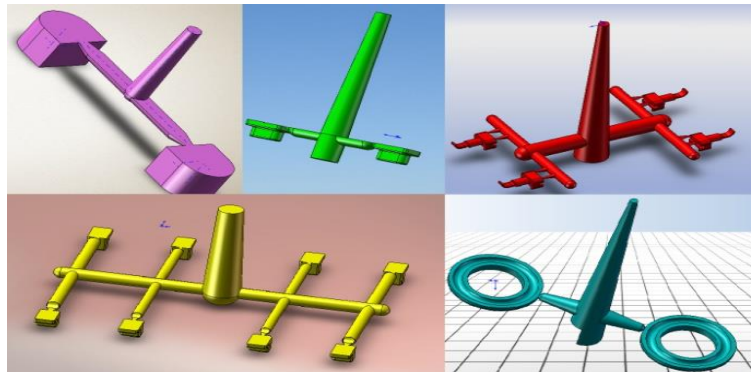


Fig. 5.18. Piese cu rețele concepute

Se observă că în trei dintre imaginile respective simularea de umplere se va realiza pentru două piese simultan iar în celelalte două simularea a fost gândită pentru umplerea a 4 piese simultan respectiv umplerea a 8 piese simultan. Reperle alese în vederea realizării de simulări de curgere în acest sens fac parte din diverse tipuri ale industriei și sunt utilizate în scop de cercetare.

Modelele referențiale prezentate anterior reprezintă seria de piese/repere concepute pentru realizarea unor studii privind curgerea materialului polimeric în matriță cu diversele avantaje sau neajunsuri.

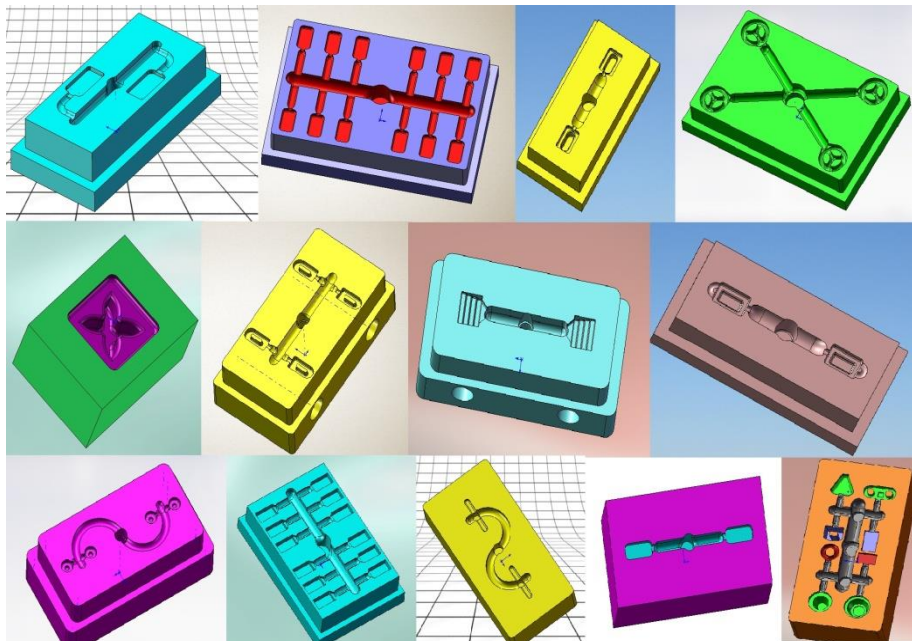


Fig. 5.19. Cavități concepute pentru uzinare



În urma realizării acestor simulări pe modelele referențiale se dorește realizarea unor cavități în pastilele concepute (fig. 5.19) destinate implementării pe o matriță realizată pentru microinjectare.

Din figura 5.19 se dorește realizarea tuturor cavităților concepute pentru uzinare și realizarea unor matrițe cu pastile amovibile astfel încât aceste pastile să poată fi înlocuite rapid și eficient în vederea obținerii de repere diferite. Prelucrarea acestor pastile precum și a cavităților aferente se va realiza în funcție de mașinile și sculele prezente în platforma operațională a catedrei de TCM din Universitatea Politehnica din Timișoara. Ultima imagine a figurii prezintă o familie de piese iar pentru acest tip de injectare se pot realiza simulări de curgere fără probleme deoarece programele specifice au implementată această opțiune.

După proiectarea unor piese și cavități destinate procedurii de microinjectare se trece la proiectarea matriței. Prin urmare, funcție de pastilele amovibile concepute se concep și celelalte elemente componente ale matriței respective cum sunt plăcile de formare, plăcile de prindere, coloanele etc.

Asupra celorlalte elemente componente ale matriței nu vom alocă nici timp nici spațiu în această lucrare deoarece consider că nu este relevant a prezenta fiecare componentă în parte a matriței concepută pentru microinjectare. Prin urmare în figura 5.20 se prezintă dimensionarea de gabarit a două tipuri de matrițe proiectate pentru microinjectare.

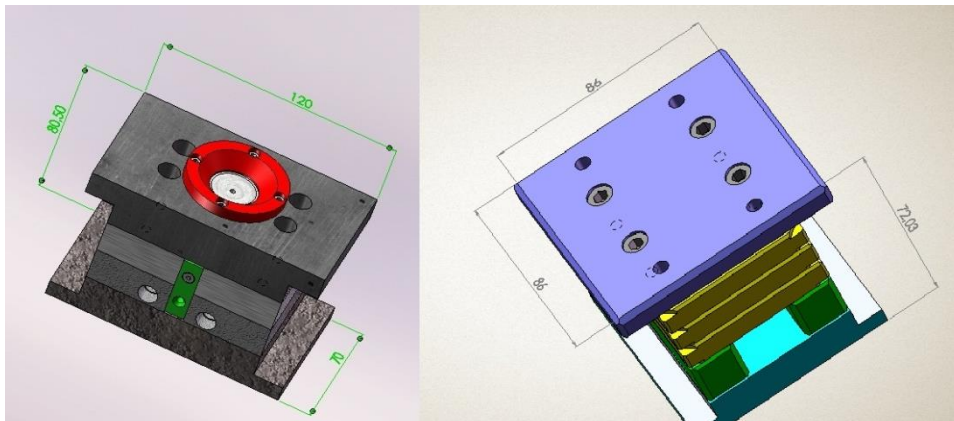


Fig. 5.20. Dimensionarea matriței pentru microinjectare.

Din dimensiunile prezentate în imaginea de mai sus se poate observa faptul că aceste dimensiuni ale plăcilor nu sunt standard ceea ce denotă că matrița concepută nu prezintă dimensiuni standardizate decât la elementele de prindere (șuruburi, bolțuri, inele de centrare etc) respectiv la cele de răcire.

Pentru matrița mai simplistă adică cea din imaginea întâi a figurii care nu prezintă decât patru plăci în componența ei este prezentată în figura 5.21 partea fixă respectiv partea mobilă a matriței proiectată în mediul SolidWorks.

Din partea fixă a matriței se pot observa placa de formare, placa de prindere pe platoul fix al mașinii de injectat, duza matriței, inelul de fixare al duzei, elementele de ghidare a plăcilor de formare și șuruburile de fixare. Partea mobilă a matriței prezintă placa de prindere a matriței pe platoul mobil al mașinii de injectat, placa de formare în care se observă pastila amovibilă cu cavitățile, coloanele de ghidare respectiv canalele specifice răcirii matriței.

O prezentare mai elaborată a acestei matrițe proiectate pentru microinjectare este reprezentată în figura 5.22. unde este clar vizibil și sistemul de răcire al acesteia. De asemenea un Explode Wiew al acestui tip de matriță este prezentat în ANEXA 5.2

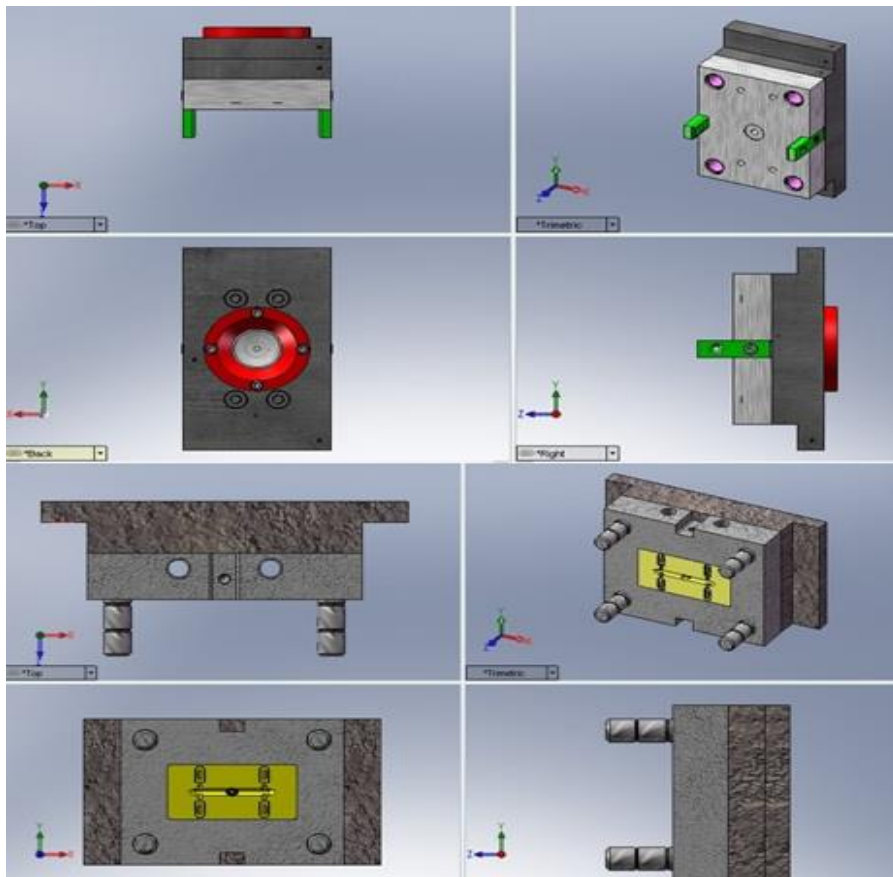


Fig. 5.21. Partea fixă și mobilă proiectată a matriței

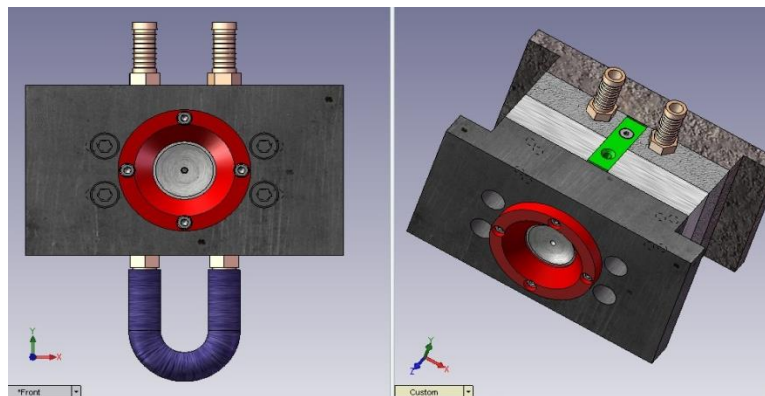


Fig. 5.22. Proiectarea matriței și a sistemului de răcire al acesteia

## 5.6. Concluzii.

Concepția și proiectarea unei matrițe necesită cunoștințe privind componența unei matrițe, scopul și modul de funcționare al acesteia. Din această perspectivă inginerul proiectant trebuie să prezinte cunoștințe elaborate privind elementele componente ale unei matrițe, noțiuni despre injectarea materialului plastic și cunoștințe privind modurile de prelucrare sau uzinare a matrițelor.

Capitolul prezintă proiectarea unor rețele, repere, cavități și matrițe destinate procesului de microinjectare.

Rețelele proiectate sunt specifice procesului de microinjectare acestea având dimensiuni sub 3mm și configurații diferite (I, H, X, stea). Proiectarea rețelelor s-a făcut pentru materiale cu vâscozitate diferită (ridicată sau scăzută) iar secțiunea utilizată pentru acestea este cea circulară din considerente de curgere.

Piesele proiectate sunt din diverse domenii, alegerea fiind condiționată în funcție de domeniile de interes și industriile specifice pieselor microinjectate. Așa cum se poate observa majoritatea reperelor proiectate au dimensiuni reduse iar greutatea acestora nu depășește un gram.

Cavitățile proiectate sunt diverse, marea majoritate a acestora fiind concepute pentru pastilele cu umăr proiectate inițial, numărul acestora fiind diferit. Astfel pastilele pot să prezinte două cuiburi, patru sau doisprezece cuiburi în cazul în care se dorește o productivitate mai mare în procesul injectării. În urma proiectării pastilelor și a cavităților de matriță s-au proiectat celelalte elemente componente ale matriței cu excepția elementelor standardizate care au fost generate de soft și la care s-au modificat doar câteva dimensiuni.

Proiectarea rețelelor, a pieselor și implicit a matriței s-a realizat în scopul unor cercetări care să vizeze în continuarea studiului doctoral curgerea materialului polimeric cu vâscozitate diferită prin rețele și cavități respectiv realizarea unor pastile amovibile pentru o matriță destinată microinjectării, precum și realizarea acesteia dacă este posibil.

## **Cap. VI – Simularea curgerii în procesul microinjectării utilizând mediul CAE.**

### **6.1 Noțiuni privind mediul CAE.**

Pe lângă sistemele de obținere a pieselor injectate sau a geometriei unei matrițe există alte ajutoare suplimentare aplicate pe calculator care ajută proiectantul în realizarea proiectelor impuse sau rezolvarea altor sarcini. Aceste programe sunt cunoscute în mare măsură sub denumirea de CAE (Computer Aided Engineering). De exemplu unul dintre aceste programe sunt specializate pentru rezolvarea procesului de injectare în matriță sau sunt destinate studiului curgerii topiturii de polimer cu ajutorul Metodei Elementului Finit (FEM). [Connor, 1976] De aceea unul dintre principalele caracteristici pe care aceste programe trebuie să le îndeplinească este capacitatea unui schimb de date între CAD și CAE. Pe lângă alte avantaje, următoarele beneficii care rezultă din utilizarea de calculatoare sunt:

- Îmbunătățirea rezultatelor de proiectare a produselor prin aplicarea unor metode științifice,
- Îmbunătățirea procesului de proiectare (regăsirea diverselor informații, acumularea de baze de date ),[Michaeli, 2001]

Accelerarea procesului de proiectare prin respectarea și executarea diverselor sarcini de rutină ( crearea, modificarea, și stocarea diverselor desene realizate ), acces mai rapid la alte baze de date (pregătirea liniilor de producție, pregătirea mediului de muncă, regândirea proceselor de producție) atunci când există calculatoare care lucrează cu software diferite și sunt interconectate.

Procesul global/general de design al matrițelor de injectat se împarte în trei faze: determinarea principiului de funcționare al matriței, proiectarea matriței din punctul de vedere reologic, al caracteristicilor termice, mecanice etc, alcătuirea datelor de producție.[Groenewoud, 2001], [Serpanalytics], [Bergi-plast]

Prima fază constă în determinarea principiului de funcționare al matriței și mai poartă denumirea de design calitativ. Această fază include diverse decizii privind alegerea numărului de cuiburi al matriței, ce tip de matriță se utilizează, modul de amplasare al sistemului de răcire sau ce tip de sistem de aruncare se va utiliza pentru evacuarea pieselor din matriță. [Mikrotech], [Sbmolde], [Incoe]

Următoarea fază de proiectare a matriței include dimensionarea complexă a funcțiilor și caracteristicilor particulare din prima fază fiind descrisă ca fiind un design cantitativ. Matrița se consolidează în această fază în funcție de considerentele reologice, termice și mecanice existând acum posibilitatea realizării de simulări de curgere ce pot să ducă la reconsiderarea numărului de cuiburi sau chiar a dispunerii acestora în matriță, simulări realizate printr-o metodă asistată de calculator (CAE ). În cadrul acestei faze din punct de vedere reologic se determină modul de curgere, alegerea punctului de injectare, calculul curgerii materialului și al presiunii de menținere și proiectarea rețelei de injectare; pentru termic se calculează ciclul de injectare, temperaturile utilizate pentru matriță și material, proiectarea sistemului de răcire sau temperare al matriței și analiza la rezistență a diverselor componente ale matriței d.p.d.v. mecanic. [Mold-tool]

Ultima fază a procesului se axează pe compilarea documentelor de producție și poate fi considerată ca fiind faza de proiectare cantitativă ce se realizează pe calculator în mediul CAD. [Michaeli, 2001]

CAE este utilizat pentru a acoperi și CAD-ul și CAM-ul totodată cu precizarea că se poate realiza acest lucru doar din punctul de vedere al stadiului de analiză. Analiza de tip CAE [Harper, 2000] include o serie de exemple ca:

- Analiza structurală pentru determinarea solicitărilor de rezistență,
- Analiză termică în care se calculează distribuția temperaturii,
- Analiza curgerii ce vizează calculul curgerii materialului printr-o regiune/secțiune definită
- Analiza mecanică în care se determină funcționarea unui sistem.

Analizele de tip CAE folosesc un model matematic care simulează procesul sau condițiile fizice pe care trebuie să le îndeplinească sistemul. De regulă acest model matematic reprezintă un set de ecuații care conține derivate parțiale ce au ca rezultat o soluție unică. Majoritatea modelelor matematice lucrează cu ajutorul metodei de discretizare care reprezintă în acest sens crearea unui set de puncte care se numesc *noduri* și pentru care se vor calcula domeniile de interes. Cea mai comună metodă de asemenea augur o reprezintă metoda elementului finit. [Long, 2009] Metoda elementului finit se axează pe regula că aceste noduri să fie aranjate astfel încât să formeze forme geometrice numite *elemente* a căror combinație să formeze un *mesh* (o suprafață/piesă). Dacă se lucrează în 2D meshul prezintă elemente triunghiulare sau cu patru laturi (dreptunghiulare) iar în cazul în care se lucrează în 3D elementele meshului au formă tetraedrală sau hexaedrală.

## 6.2. Analiza cu element finit.

Metoda elementului finit (FEM) reprezintă una dintre cele mai bune metode existente de realizare a diferitelor calcule și simulări în domeniul ingineriei. Această metodă și desigur programele care o încorporează au devenit componente de bază ale sistemelor moderne de proiectare asistată pe calculator. [Solin, 2006]

Analizele realizate prin metoda 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. [Long, 2009], [Donea, 2003]

De regulă în inginerie se utilizează analiza cu element finit în cazul instalațiilor, echipamentelor, mecanica fluidelor sau în domeniul construcțiilor de mașini. Marea majoritate a aplicațiilor de acest tip sunt axate pe industria mecanică unde sistemul analizat este supus la diverse încercări (la flambaj, la rupere sau la oboseală), trebuie să asigure o anumită funcționalitate sau anumite mișcări într-un ansamblu, trebuie să fie stabil d.p.d.v. static sau dinamic sau prezintă diverse restricții în funcționare sau în exploatare. [Ghionea, 2007]

În cele mai multe cazuri disciplina mecanică poate fi subdivizată în patru mari categorii: teoretică, aplicată, computerizată și experimentală. [Hutton, 2004]

*Mecanica teoretică* are la bază legi fundamentale și principii ale mecanicii care sunt studiate pentru valorile intrinseci. *Mecanica aplicată* transferă cunoștințele teoretice în aplicații științifice și ingineresti în special pentru a construi diverse modele matematice pentru fenomenele fizice. *Mecanica computerizată* rezolvă probleme specifice prin combinarea modelelor matematice cu metodele numerice implementate pe computere, proces care poartă denumirea de *simulare*.

*Mecanica experimentală* pune laolaltă legile fizice, modelele matematice și simulările numerice pe ultima treaptă de observații, aici predominând rezultatele

practice, palpabile. Mecanica computerizată este puternic interdisciplinară iar principalele discipline care contribuie major la dezvoltarea acesteia sunt redată în figura 6.1.[Advanced, 2011]

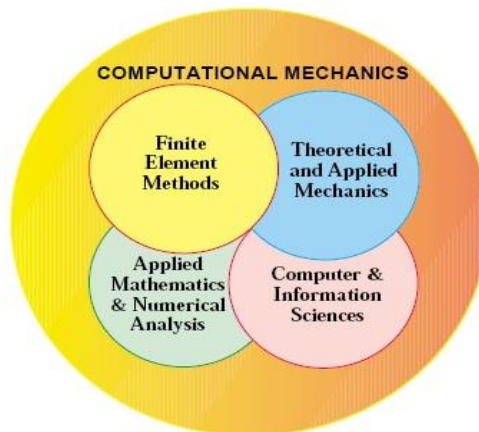


Fig. 6.1. Disciplinele mecanicii computerizate [Advanced, 2011]

Unul dintre avantajele majore ale metodei de analiză cu ajutorul elementelor finite îl reprezintă simplitatea conceptelor de bază. Este foarte important ca utilizatorul unui program FEM să înțeleagă și să aplice corect aceste concepte fiindcă ele includ anumite ipoteze, simplificări și generalizări. Dacă unele dintre acestea se ignoră în analiza FEM a unui produs pot să apară erori diverse. Cele mai importante dintre conceptele de bază utilizate în analiza cu element finit sunt:

- Structura,
- Modelul de calcul,
- Rețeaua de noduri și elemente,
- Nodul,
- Elementul finit.

Conceptul de structură este utilizat pe scară largă în cazul analizei cu element finit și reprezintă un ansamblu de plăci, învelișuri și volume (solide). Ca structură putem considera carcasa unui automobil, brațul unui robot, o rețea de conducte, osia unei locomotive etc. Structurile prezintă în general diverse forțe (forțe axiale, de forfecare, de îndoire sau momente de torsiune) iar în inginerie a fost acceptată noțiunea de "forțe concentrate". [Ghionea, 2007]

Modelul de calcul se bazează de cele mai multe ori pe utilizarea unui model matematic sau pe crearea unui model de calcul care să ofere rezultate veritabile pentru a analiza o structură (piesă) dată. Modelele FEM sunt de regulă modele matematice aproximative, neexistând practic un model universal, general sau unic care să aproximeze structura 100% fără erori. Pentru aceeași structură se pot utiliza în practică mai multe modele, toate corecte dar cu performanțe diferite.

Rețeaua de noduri și elemente sau **meshul** reprezintă un model al structurii analizate ce este alcătuit din linii, suprafețe plane sau curbe și volume. În starea de mesh neprelucrat sau de dezvoltare modelul este continuu cu un număr infinit de puncte ce se aseamănă cu o structură reală. Scopul analizei cu element finit este discretizarea, adică obținerea unui mesh finit, transformarea structurii reale, continue într-un model discret cu un anumit număr de puncte denumite noduri. Prin urmare modelul se acoperă cu un astfel de mesh care calculează valorile nodurilor



din interiorul modelului creat astfel încât să se obțină un număr de noduri suficient de mare în zonele de interes pentru a obține o aproximație satisfăcătoare a geometriei structurii dorite.

Punctele definite în urma operației de discretizare ce fac parte dintr-un mesh poartă denumirea de noduri. [Hutton, 2004] În aceste noduri se definesc necunoscutele nodale primare ale căror valori sunt rezultatele analizei cu elemente finite. Dacă necunoscutele asociate nodurilor sunt deplasări va rezulta un model deplasare iar în cazul în care necunoscutele sunt tensiuni va exista un model al tensiunilor. La un model tipic de deplasări fiecare nod poate avea maxim șase componente ale deplasării denumite deplasări nodale în raport cu un reper global: trei componente  $u, v, w$  ale deplasării liniare și trei rotații  $\phi_x, \phi_y$  și  $\phi_z$ . Astfel pot fi definite toate gradele de libertate ale structurii geometrice. O parte dintre gradele de libertate ale modelului este nevoie să fie eliminate deoarece anumite noduri sunt conectate la reazeme iar deplasarea acestora este nulă. [Ghionea, 2007]

Elementul finit este fragmentul de formă prismatică sau tetraedrică rezultat în urma discretizării modelului. Aceste elemente sunt conectate între ele prin nodurile comune ce sunt vârfurile tetraedrelor sau prismelor (vezi figura 6.2). Un element finit poate fi considerat ca fiind o componentă de sine stătătoare iar studiul care realizează are un caracter de analiză singulară (pe element) iar apoi un caracter de analiză unitară (a întregului mesh). [Saxena, 2005]

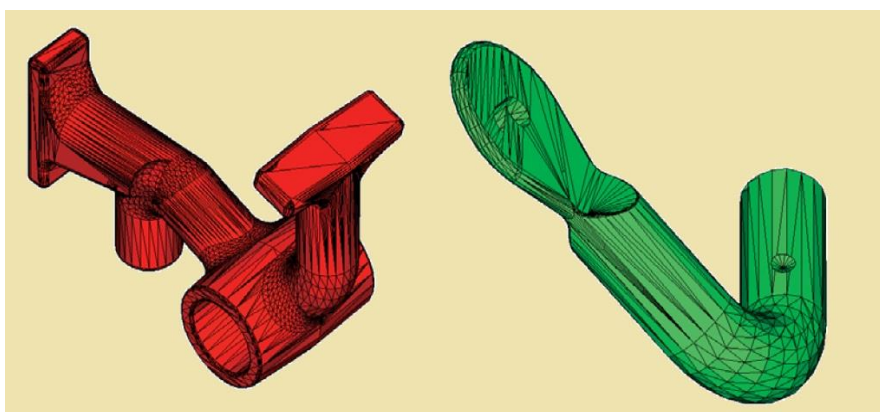


Fig. 6.2. Evidențierea elementelor constitutive ale meșhului [Kallien, 2011]

Astfel se obține o aproximație a structurii reale iar procesul de discretizare al structurii trebuie să fie cât mai performant ceea ce implică respectarea unor reguli și exigențe privind discretizarea, elaborarea modelului de calcul și utilizarea unor elemente finite adecvate. De regulă dimensiunea elementelor finite poate tinde spre zero dar trebuie să fie întotdeauna finite. Elementele finite se pot clasifica astfel: după tipul de analiză (liniar elastică, neliniară, mecanica fluidelor, ș.a.), după rolul funcțional (de contact, de frecare, de legătură etc), după forma geometrică (linie, triunghi, patrulater, tetraedru etc), după numărul nodurilor, după numărul gradelor de libertate ale nodurilor, după gradul polinomului de interpolare și după caracteristicile materialului utilizat în simulare.

Dintre avantajele FEM se pot aminti:

- generalitatea,
- suplețea,
- simplitatea conceptelor de bază,



- ❑ utilizarea calculatorului,
- ❑ exigența programelor FEM.

Dintre dezavantajele și limitările metodei FEM se pot aminti:

- ❖ aproximarea metodei,
- ❖ modelul de calcul este subiectiv și arbitrar,
- ❖ elaborare laborioasă a modelului de calcul,
- ❖ resursele sistemelor de calcul.

### 6.3. Programe destinate simulării curgerii

Analiza cu elemente finite este utilizată și în cazul comportării reologice (la curgere) a materialelor polimerice nu doar în cazul solicitărilor mecanice cunoscute unde programe ca SolidWorks, ProEngineer, Unigraphics, Nastran, Solid3D, ANSYS, Abaqus, AutoFEM, GeoFEM, Comsol Multiphysics, VisualFEA, FlowMaster, Fluent by Fluent, CAE Flow Simulațion, FluidFlow3 pot oferi rezultatele așteptate. [Long, 2003]

Printre programele 3D destinate simulării curgerii materialului polimeric amintim Moldflow, Sigma3D, Cadmould, Rem3D, Simpoe, Moldex3d, I-Deas, VisiFlow, s.a. De asemenea anumite laboratoare din lume și diverse centre de cercetare ale firmelor specializate pe domeniul matrițelor și-au creat propriile softuri menite să simuleze curgerea materialelor polimerice în injectarea convențională sau în cazul special al microinjectării. [Moguedet, 2007], [Hutton, 2004]

#### 6.3.1. Caracteristicile programului Autodesk Moldflow

Programul Autodesk MoldFlow prezintă o serie de module dintre care cele mai importante sunt **MoldFlow Plastic Adviser** respectiv **Moldflow Plastics Insight**, Moldflow Design Link, Moldflow CAD Doctor, Moldflow Magics STL Expert și Moldflow Structural Alliance. [Autodesk]

Modulul **MoldFlow Plastic Adviser** prezintă diverse faze din procesul de curgere al unui material polimeric la umplerea matriței. Modulul realizează rapid și eficient analiza curgerii în cazul pieselor simple sau complexe și poate să facă acest lucru în cazul unei singure piese, a unui grup sau a unei familii de piese. Cu programul MoldFlow se poate analiza curgerea materialului plastic în cavitatea matriței și se poate optimiza tipul de dig, dimensiunile rețelei și secțiunea acesteia pentru piesa la care se realizează simularea. De asemenea programul poate să evalueze timpul în care v-a avea loc injectarea materialului, calculează presiunile la injectare și volumul de material injectat și oferă informații privind ciclul de injectare. Programul prezintă o bază de date bogată ce conține mai mult de 7800 de materiale plastice cu caracteristici speciale pentru utilizarea în analiza CAE. [Moldflow\_b, 2010] Programul mai prezintă și alte module ce pot să extindă analiza curgerii și pot fi adăugate ulterior softului cumparat.

Modulul integrat softului **Autodesk Moldflow, Plastic Adviser** prezintă două subramuri de analiză: Part Adviser respectiv Mold Adviser. Așa cum spune și numele Part Adviser analizează doar piese simple fără a reuși simularea unei familii de piese sau pentru o matriță cu două sau mai multe cuiburi fapt pentru care există și opțiunea de MoldAdviser. Mold Adviser prezintă la capitolul capabilitate: analiza curgerii materialului plastic, analiza calității răcirii, analiza privind alegerea punctului de injectare, analiza privind alegerea rețelei de injectare și echilibrarea acesteia, analiza matriței piesei și analiza unor defecte care pot să apară la piesa respectivă.

*Analiza curgerii materialului plastic* realizează o serie de proprietăți privind injectarea piesei cum ar fi distribuția presiunii, temperatura frontului de curgere,

orientarea curgerii, liniile de sudură apărute la curgerea materialului și locația golurilor de aer din piesă. [Moldflow\_a, 2010]

*Analiza calității răcirii* în cadrul programului are ca și caracteristică principală identificarea unor porțiuni de piesă unde temperatura este mai concentrată, ceea ce poate facilita apariția unor retasuri în piesă dar și unde se necesită un timp de răcire mai îndelungat.

*Analiza privind alegerea punctului de injectare* determină locația optimă adecvată pentru alegerea punctului de injectare și prezintă zonele nerecomandate de amplasare a punctului de injectare.

*Analiza privind alegerea rețelei de injectare și echilibrarea acesteia:* determinarea automată a dimensiunilor optime pentru culee, rețea și dig în cazul unei piese sau a unei familii de piese. În cazul unor familii de piese se determină automat rețeaua de curgere echilibrată pentru acestea. De asemenea există posibilitatea alegerii unei injectări cu canale încălzite. [Autodesk]

*Analiza matriței piesei:* determină condițiile optime de procesare și realizează o evaluare a designului piesei în procesul de injectare. Utilizează mărimea matriței pentru comparația contracției piesei în cazul diferitelor materiale, schimbarea punctului de injectare și aprecierea calității piesei injectate.

*Analiza retasurilor în piesă* precizează locația posibilă în care apar defecte de acest tip în piesă și prezintă severitatea acestora.

Avantajele modulului Moldflow Plastic Adviser (MPA) [Moldflow\_a, 2010]:

- ◆ Realizarea și analiza virtuală a tuturor tipurilor de rețele de injectat;
- ◆ Obținerea automată a dimensiunilor rețelei pentru echilibrarea curgerii în cazul simulării pe familii de piese;
- ◆ Determinarea celui mai bun loc pentru amplasarea digului precum și numărul optim de diguri;
- ◆ Evaluarea ciclului de injectare, a forței de închidere și a volumului de material injectat;
- ◆ Identificarea materialelor optime pentru piesa aleasă;
- ◆ Identificarea și eliminarea defectelor piesei cum ar fi goluri de aer, linii de sudură și retasuri;
- ◆ Vizualizarea orientării curgerii materialului plastic pentru maximizarea tensiunilor din piesă ;
- ◆ Realizarea estimativă a costurilor de fabricație a piesei;

Un modul mai complex al programului **Autodesk MoldFlow** îl reprezintă **Plastic Insight**. Acesta poate realiza simulări, analiză, optimizare, validarea piesei din material plastic și designul matriței. Programul prezintă nouă procese de injectare unice și se utilizează în industriile auto, medicală, aeronautică, electronică, bunuri de larg consum etc. [Moldflow\_b, 2010]

**Moldflow Plastics Insight** este singurul program de simulare ce poate suporta toate cele trei analize privind piesele: modelul tradițional mid-plane cu element finit, modelul solid cu pereți subțiri și modelul solid 3D de piese groase.

*Modelul tradițional cu planul central.* O suprafață cu *planul central* reprezintă o piesă tridimensională cu o suprafață plană plus o grosime atribuită acestei suprafețe în două-dimensiuni. Suprafețele cu planul central dau cele mai bune rezultate în cazul aplicațiilor de simulare la turnarea prin injecție în cazul pieselor cu pereți subțiri. Pentru creșterea productivității la crearea și analiza unor astfel de modele cu pereți subțiri, MPI / Midplane Generator (generatorul unui plan central) poate genera automat o suprafață cu planul central care să asigure o grosime necesară piesei astfel încât rezultatele analizei să fie precise și sigure.

*Modelul amestec/contopire.* Bazată pe tehnologia brevetată Dual Domain a programului Moldflow, Fusion (contopire) adaugă o graniță sau un învelis suprafeței exterioare ale unui model 3D CAD (STL, IGES, etc.). Acest lucru permite analiza directă a unor modele solide de piese cu pereți subțiri. Fără a fi necesară o pregătire suplimentară a modelului se pot analiza mai multe iterații de proiectare sau se pot efectua mai multe analize aprofundate.[ Moldflow\_b, 2010]

*Modelul 3D.* Folosind o tehnică bazată pe un solid, a unui **mesh** bazat pe metoda elementului finit și având o formă tetraedrală soluția MPI/3D permite execuția unei adevărate simulări geometrice tridimensionale care nu se consideră ca fiind standard/obișnuită cu pereți subțiri. MPI/3D funcționează bine cu piese de tip conectori și componentele electrice ce prezintă o structură grosă și chiar piese cu grosime de perete excesiv variabilă.

*Reducerea timpului total de prelucrare.* Timpul total de prelucrare include atât pregătirea modelului cât și analiza acestuia în timp. Acești factori depind foarte mult de complexitatea piesei și designul matriței precum și de opțiunile selectate de utilizator pentru analiză. Produsele Moldflow oferă o gamă largă de soluții software astfel încât utilizatorul să poată să obțină rezultate în timp real și cât mai precis posibil pentru fiecare aplicație unică.

Programul **MoldFlow Plastics Insight** prezintă o serie de module care la randul lor sunt împărțite în submodule. Dintre acestea amintim: simularea curgerii materialului plastic, simularea optimizării procesului de injectare, simularea răcirii matriței, simularea integrității structurale, simularea injectării prin reacție.

*MPI/Synergy*-operație combinată orientată spre acelaș rezultat. MPI / Synergy reprezintă pre/post-procesor care suportă toate modulele de analiză MPI, oferind un flux de lucru puternic și instrumentele necesare de productivitate pentru modelare, discretizare, editare a meșului, de validare a modelului, vizualizarea rezultatelor și raportul complet într-o singură prezentare.

*Simularea curgerii materialului plastic sau MPI/Flow (curgere)-simulează* fazele de umplere și ambalare a procesului de turnare prin injectare a materialelor termoplastice pentru a prezice comportamentul topiturii frontului de curgere astfel încât să se poată asigura fabricarea piesei. Utilizarea MPI/Flow permite: optimizarea locației punctului de injectare, echilibrul rețelelor, posibilitatea evaluării condițiilor de procesare pentru a oferi o matriță robustă și identificarea și corecția potențialelor defecte ale piesei. [Saxena, 2005] De asemenea modulul prezintă simularea curgerii în matriță cu două puncte de injectare sau mai multe sau chiar cu injectare bicomponentă, analizează efectele temperaturii non-uniforme ale matriței, optimizează timpul de închidere al clapetei antiretur, compară curgerea prin intermediul sistemelor de rețea cu canale calde în comparație cu rețelele reci și analizează dinamica dozării. Cu module opționale MPI/Flow poate simula mai multe procese complexe de injectat a materialelor termoplastice.

*MPI/Gas (injectare cu gaz)* este specifică simulării procesului de turnare prin injectare asistată cu gaz caz în care un gaz, de obicei azotul inert este injectat în topitura de polimer. Gazul circulă prin polimer înspre cavitatea matriței pentru a completa umplerea și a crea o rețea de canale tubulare în întregul component. Rezultatele MPI /Gas ajută la determinarea poziției polimerului și intrărilor de gaze, cât de mult material plastic să fie injectat înainte de injectarea gazului, precum și dimensiunea optimă și amplasarea canalelor de gaz.[ Moldflow\_b, 2010]

*MPI/Co-Injection (injectare bi- componentă)* simulează secvența procesului injectare bi-componentă, în cazul în care o peliculă de material este injectat pentru prima oară/dată, urmată de injectarea unui material diferit de cel de bază injectat anterior. Se pot vizualiza avansarea materialelor în cavitatea matriței și se pot

observa relațiile dinamice dintre peliculă și materialul de bază ca progres al curgerii. Rezultatele obținute se folosesc pentru a optimiza combinația a două materiale în timp ce performanțele globale / raportul costului pentru produs este maximizat.

*MPI/Co-Injection Compresion (injectare prin compresie)* simulează procesele în care injectarea polimerului și compresia matriței apar simultan sau succesiv și permite programarea unei faze de compresie care poate începe înainte, în timpul sau după injectarea polimerului. Rezultatele obținute cuprind evaluarea completă a materialelor candidate, designul piesei, designul matriței și condițiile procesului.

*MPI/MuCell (injectare microcelulară)* simulează procesul de injectare microcelulară, în care un fluid supercritic, cum ar fi dioxidul de carbon sau azotul este amestecat cu polimer topit și injectat în matriță pentru a produce o spumă microporoasă. Cu MPI/MuCell, se poate evalua fezabilitatea și beneficiile de a utiliza acest proces de turnare prin injecție în comparație cu cele tradiționale. În plus se poate optimiza proiectarea piesei și setările procesului de curgere prin revizuirea diferitelor rezultate cercetate. [Autodesk]

*Simularea optimizării procesului de injectare sau MPI/Design-of-Experiments (design de experimente)* permite efectuarea unei secvențe de analiză automată, în care parametrii specificați pot varia, cum ar fi temperaturile matriței și a materialului, timpul de injectare, presiunea de menținere și grosimea piesei. Programul analizează rezultatele pentru a ajuta utilizatorul să optimizeze parametrii procesului de injectare și în cele din urmă, piesa injectată. Rezultatele includ indicatorii de calitate unici cum sunt contracția volumică, presiunea de injecție, forța de închidere și temperatura frontului de curgere, precum afișează și timpul de umplere, presiunea și distribuțiile de temperatură.

*MPI/Optim (optimizarea)* permite o analiză specifică pentru mașinile de injectat cum ar fi timpul de răspuns al mașinii, viteza maximă de injectare precum și viteza și presiunea programată de operatorului mașinii. Rezultatele obținute sunt utilizate pentru a compara viteza uniformă a materialului și temperatura acestuia prin duza de injectare a mașinii, sistemul de alimentare cu material și cavitățile proiectate ale piesei.

*Simularea răcirii matriței sau MPI/Cool (răcire)* oferă instrumente pentru modelarea circuitului de răcire al matriței, insertii, baza din jurul piesei și analizează eficiența sistemului de răcire al matriței. Simularea MPI/Răcire permite utilizatorilor să optimizeze matrița și designul sistemului de răcire pentru a realiza o răcire uniformă a piesei, a minimiza ciclul de lucru, a elimina contracția piesei datorată factorilor de răcire și de scădere a costurilor totale de fabricație.

*Simularea integrității structurale sau MPI/Warp (deformare/incovoiere)* ajută la anticiparea contracției și a deformării pieselor din materiale plastice din procesul indus de solicitare precum în cazul unei deviații spațiale a miezului/poansonului unei matrițe de injectat din cauza neuniformității distribuției presiunii. Cauzele de deformare descoperite acolo unde apar acestea, permit utilizatorului să optimizeze design-ul piesei, alegerea materialelor și a parametrilor de prelucrare pentru a controla deformațiile piesei înainte ca matrița să fie realizată.

*MPI/Fiber (fibră)* prezice orientarea fibrelor în cazul frontului de curgere a materialelor plastice în fibre plastificate umplute și rezultatul rezistenței mecanice a plasticului. Este foarte important să se înțeleagă și să se controleze orientarea fibrelor în termenul de fibre de material plastic umplute pentru a reduce variațiile contracției pe întreaga suprafață a modelului injectat pentru a reduce sau elimina deformarea piesei.

*MPI/Shrink (contracție)* prezice contracția polimerului bazată pe efectele de prelucrare și pe gradul de topire specific materialelor plastice și oferă o contracție

liniară reală independentă de analiza deformării. Deoarece componentele din plastic se contractă când acestea încep să se răcească, este esențial să se țină cont de precizia de prelucrare a matriței specifică contracției astfel încât să nu existe toleranțe critice ale produsului.

*MPI/Stress (solicitare la încărcare/presiune).* Solicitarea la presiune prezice performanța pieselor din materiale termoplastice înainte de injectare atunci când piesa este supusă la diverse forme de încărcare externe. Analiza ia în considerare efectele de curgere a plasticului în timpul injectării în matriță și rezultatul proprietăților mecanice privind integritatea structurală a componentelor.

*Simularea injectării prin reacție sau MPI/Reactive Molding* simulează curgerea și protejarea rășinilor termorezistente într-o varietate de procese de injectare prin reacție, incluzând injectarea materialelor termorigide și a cauciucului precum și aplicații RTM /SRIM (Resin Transfer Molding/Structural Reaction Injection Molding). Rezultatele sunt utilizate pentru a evalua producția piesei, minimizarea ciclului de injectare și optimizarea condițiilor de procesare. [Moldflow\_b, 2010]

*MPI/ Microchip Encapsulation (încapsularea de microcipuri)* simulează încapsularea de cipuri semiconductoare cu rășini reactive, inclusiv palete sau aripi mici și prezice distanța acestora. Analiza rezultatelor ajută utilizatorul să protejeze pachetul de încapsulare, instrumentele, suportii de conexiune și cabluri și să optimizeze condițiile de transformare, inclusiv temperatura matriței, timpul de umplere, viteza pistonului mașinii de injectat și timpul de menținere.

*MPI/ Underfill Encapsulation (încapsularea sub presiune)* simulează procesul de încapsulare sub presiune, denumit încapsulare flip-chip pentru a anticipa curgerea unui material încapsulant în cavitatea matriței, între cip și substrat.

### 6.3.2. VisiFlow caracteristici;

Programul Vero Visi prezintă o serie de module dintre care amintim CAD, CAM, Flow, Mould progres și Wire. VisiFlow este un program complex ce se bazează pe analiza cu elemente finite și include realizarea simulărilor curgerii materialului termoplastic prin rețele și cavități. [Vero-software]

Programul prezintă o serie de opțiuni privind procesarea și studiul materialelor termoplastice. Dintre acestea amintim: termorigide și cauciuc, injectarea bi-componentă, matrițarea cu inserții, analiză specifică matrițelor, realizarea remeșului, selectarea constrângerilor în mod automat, calculul grosimii de perete a piesei și injectarea la temperaturi ridicate. Visi Flow Thermoset & Rubber reprezintă o aplicație capabilă să realizeze simulări cu materiale termorigide și cauciucuri și să prezinte diverse rezultate specifice realizării procedurii. Pentru injectare este nevoie să se aleagă materialul din baza de date pe care o are programul, să se aleagă proprietățile matriței și să se prezinte tipul de vâscozitate al materialului.

Injectarea bi-componentă este specifică tipului de injectare a unei piese din două materiale diferite. În acest caz programul poate simula secvențial injectarea bi-componentă chiar dacă primul material nu s-a răcit, se poate determina o degradare termică a materialului de substrat, se poate optimiza suprafața de tranziție, se pot prezice golurile de aer din piesă și se poate prezice temperatura topiturii la nivelul adeziunii celor două materiale. Matrițarea cu inserții reprezintă procesul prin care o inserție metalică este încorporată într-o piesă din plastic. Analiza umplerii în acest caz ține cont de diferența de temperatură dintre inserție și placa matriței și prezintă tensiunile interne ce pot să apară datorită materialului polimeric ce nu poate să facă priză bună cu inserția în cauză. Remesherul prezintă o

importanță deosebită datorită faptului că se pot importa direct fișierele de tip STL fără a mai fi nevoie să fie prelucrate de interfața VISI. Acest lucru se poate realiza fără pierderea dimensiunilor triunghiurilor din zonele mai complexe ale piesei sau fără pierderea proprietăților geometrice ale acesteia. [Vero-software]

Injectarea la temperatură ridicată este specifică de regulă microinjectării. Aceasta constă în menținerea suprafeței matriței aproape de temperatura de tranziție vitrosă a materialului în timpul procedurii ceea ce prezintă ca avantaje: piese fără linii de sudură, suprafața a piesei excelentă și fără imperfecțiuni. Pentru a obține aceste lucruri este nevoie ca suprafața matriței să fie în permanență răcită astfel ca ciclul de injectare să fie reluat rapid. Programul subordonează curgerea materialului plastic într-o analiză termică a unui stadiu de căldură și se consideră distribuția temperaturii matriței pentru analiza curgerii. Programul mai prezintă și opțiunea alegerii dimensiunilor și analizei unei rețele cu canale calde pentru matrița ce se dorește a fi realizată. Utilizatorul își poate crea propria rețea cu canale calde cu ajutorul librăriei standard pe care programul o are în baza de date.

### 6.3.3. Simpoe caracteristici;

Programul Simpoe-Mold reprezintă un program specific de analiză cu element finit ce prezintă procesul de injectare în matriță, iar SimpoeMV este interfața programului. [Long, 2009]

Programul este destinat să ajute inginerii de proces și proiectanții de matrițe să previzualizeze diverse fenomene ce au loc în timpul procesului de injectare astfel: modul de curgere al materialului, distribuția presiunii, distribuția temperaturii topiturii de material, distribuția tensiunilor, a vitezei de curgere, distribuția contracției de material, a orientării fibrelor, distribuția penetrării gazului etc. De asemenea programul este conceput astfel încât să ofere utilizatorului posibilitatea să decidă asupra diversilor parametrii din proces cum sunt: poziția digului, poziția sistemului de ventilație, designul rețelei utilizate, poziția cavitațiilor etc. Mai mult presiunea de injectare, temperatura matriței, forța de închidere, timpul de menținere și presiunea de menținere necesară procesului pot fi alese cu ajutorul softului. [Simpoe, 2010]

Simularea în acest soft se bazează pe trei tipuri de modele: cochilie, suprafață și solid. Simularea de tip cochilie utilizează modelul solid 3D ce se bazează pe fișierul STL pentru care nu este nevoie de discretizare. De asemenea procedura mai este aplicată cu succes modelelor 3D cu pereți subțiri. Simularea modelului de tip suprafață este valabil pentru modelele cu pereți subțiri cu o grosime de perete bine determinată. Simulările de tip solid se pretează modelelor reale 3D cu pereți subțiri, groși sau cu secțiuni variabilă. [Simpoe, 2010]

Dintre modulele programului Simpoe amintim:

*Flow-Pack Analysis* (Analiza curgerii și a menținerii) care conține analiza umplerii respectiv a menținerii materialului termoplastice în matriță și poate conține injectarea tradițională, injectarea bi-componentă, injectarea asistată de gaz, simulări privind orientarea fibrelor și a tensiunilor reziduale. Variabilele din proces ce pot fi obținute în urma analizei sunt: timp de umplere, presiune de injectare, presiune de menținere, temperatura optimă a topiturii, contracția piesei, linii de sudură, orientarea fibrelor ș.a.

*Cool Analysis* conține modul de analiză prin care se efectuează răcirea materialului polimeric în matriță și care poate prezice timpul probabil de răcire al întregului proces, distribuția temperaturii piesei la aruncarea din matriță, temperatura medie a matriței, fluxul mediu de căldură etc.

*Warp-Analysis* se referă la contracția sau deformația reperului din materialul polimeric datorită tensiunilor interne sau procesului de injectare. Rezultatele tensiunilor reziduale sau temperatura piesei la sfârșitul injectării sunt vitale pentru o analiză reală a deformațiilor. Modulul se bazează pe metoda elementului/volumul finit a analizei structurale cu modelul solid. Astfel se poate prezenta deformația piesei în direcția x, y sau z care este aceeași cu tensiunea reziduală a piesei.

#### **6.3.4. Moldex 3D caracteristici.**

Programul de simulare de curgere Moldex3D se bazează pe metoda BLM (Boundary Layer Meshing). Această metodă este o metodă hibridă de discretizare a meshului și prezintă dezavantajul că utilizatorul este nevoit să petreacă mai mult timp pentru rezolvarea problemelor de analiză decât în cazul realizării unor meshuri de tip tetraedral. De regulă calitatea meshului în acest caz este cu mult superioară celui de tip tetraedral dar e necesar să se consume un timp de lucru de două-trei ori mai mare sau chiar mai mult pentru rezolvarea unei aplicații. [Moldex]

Dacă ar fi să facem o comparație între tipurile de mesh existente, aplicația acestora și timpul aproximativ de discretizare vom avea:

- ❖ autotetraedral mesh destinat doar pieselor cu pereți subțiri cu timp de discretizare a meshului de 3-6 ore,
- ❖ mesh hibrid destinat pieselor cu pereți groși și subțiri cu timp de discretizare a meshului de 1-3zile,
- ❖ mesh de tip strat limită (hibrid) destinat pieselor cu pereți groși și subțiri cu timp de discretizare a meshului 4-8ore.

Avantajele metodei BLM sunt: realizarea simplă a unui mesh, crearea într-o zi a unui mesh hibrid dintr-un solid, ușurința prin care se pot controla elementele solidului, calitate superioară a elementelor obținute și o rezoluție net superioară a elementelor obținute. [Moldex]

Tipurile de analiză specifice acestui program sunt analiza de tip cochilie respectiv analiza de tip cochilie în matriță. Analiza de tip cochilie reprezintă de fapt analiza piesei dorite, iar în cazul analizei în matriță sunt introduse în simulare elemente de genul rețea de injectare, sistem de răcire respectiv baza matriței.

Un alt tip de analiză este analiza unui mesh solid pentru care se poate realiza simularea de curgere, menținere în matriță respectiv contracție a piesei.

### **6.4. Simularea curgerii prin rețele și cavități în mediul CAE.**

Înainte de a discuta despre simularea prin rețele și cavități să trecem în revistă simularea cu ajutorul calculatorului a digului utilizat la umplerea diferitelor piese proiectate. [Zienkiewicz, 2000]

În acest sens 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. [Jones, 08]

Pentru piesele cu pereți subțiri acest lucru este foarte important deoarece amplasarea punctului de injectare trebuie realizată cât mai eficient astfel încât să se ofere 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 convenționale utilizate. [Moalli, 2001], [Solin, 2006]

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. [Bariani, 2007], [Chang, 2007] 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.

#### 6.4.1. Simularea curgerii prin rețele în mediul MoldFlow;

În mediul de proiectare SolidWorks au fost proiectate o serie de rețele de injectat destinate procesului de microinjectare cu diametre ce nu depășesc 3mm care ulterior vor fi supuse simulării de umplere/curgere în programul de analiză cu elemente finite Autodesk MoldFlow.

Rețelele proiectate în acest sens au în general secțiuni circulară deoarece aceasta prezintă conform celor afirmate în capitolul 2 (subcapitolul 2.5) cea mai bună soluție aleasă privind curgerea materialului polimeric [Macoso, 1994], [Chang, 2007] prin secțiune finită. Proiectarea acestor tipuri de rețele a fost realizată în scopul consolidării tabelului privind lungimea maximă de rețea în funcție de diametrul acesteia, de vâscozitatea de material cu aplicație la microinjectare. Prin urmare au fost proiectate rețele de diverse tipuri pentru materiale cu vâscozitate ridicată respectiv pentru cele cu vâscozitate scăzută.

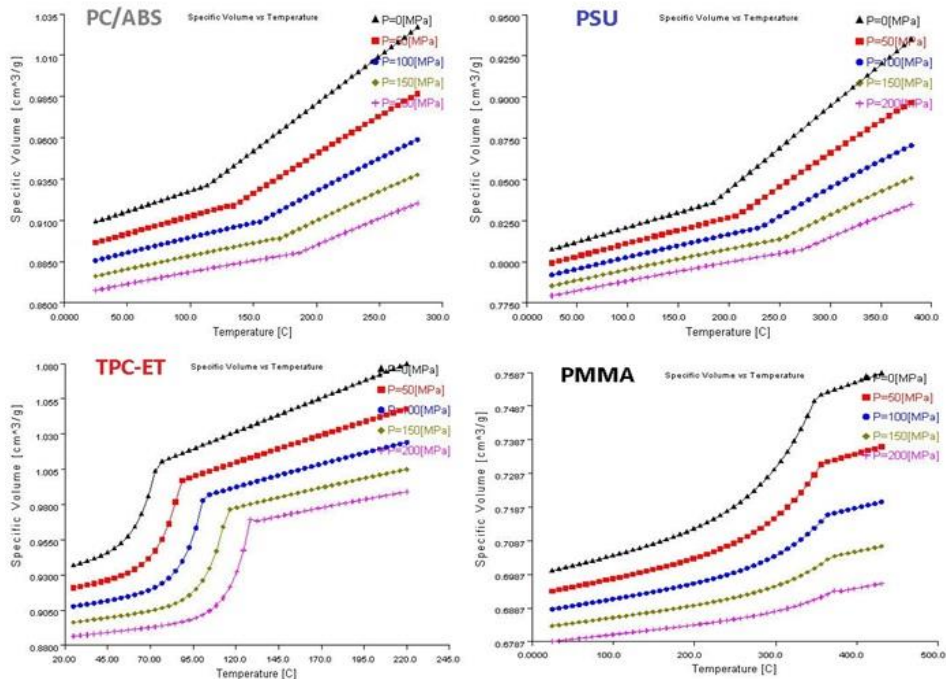


Fig. 6.3. Diagrama PVT pentru materialele cu vâscozitate ridicată [Autodesk]

Simulările pe diverse tipuri de rețele de asemenea dimensiuni (sub 3mm) au fost realizate cu materiale diverse conform ANEXEI 6.1 de la distribuitori din Europa conform softului Moldflow ce puteau fi achiziționate ulterior pentru încercări practice. Astfel dintre materialele ce prezintă o vâscozitate ridicată au fost utilizate următoarele patru tipuri: **Excelloy CK 12** (PC/ABS) de la firma *Techno Polymer*, **Vespel CF 30NC** (PMMA) produs de firma *Du Pont Europe*, **Ultrason S2010** (PSU) produs de firma *BASF* respectiv **Hytrel 3078** (TPC-ET) comercializat de cei de la firma *Du Pont Europe*. Pentru materialele polimerice amintite se prezintă în figura 6.3 diagrama PVT a acestora.

Tot prin diagrame (fig. 6.4) sunt prezentate proprietățile reologice ale celor patru materiale mai exact viteza de deformare în funcție de vâscozitatea materialului.

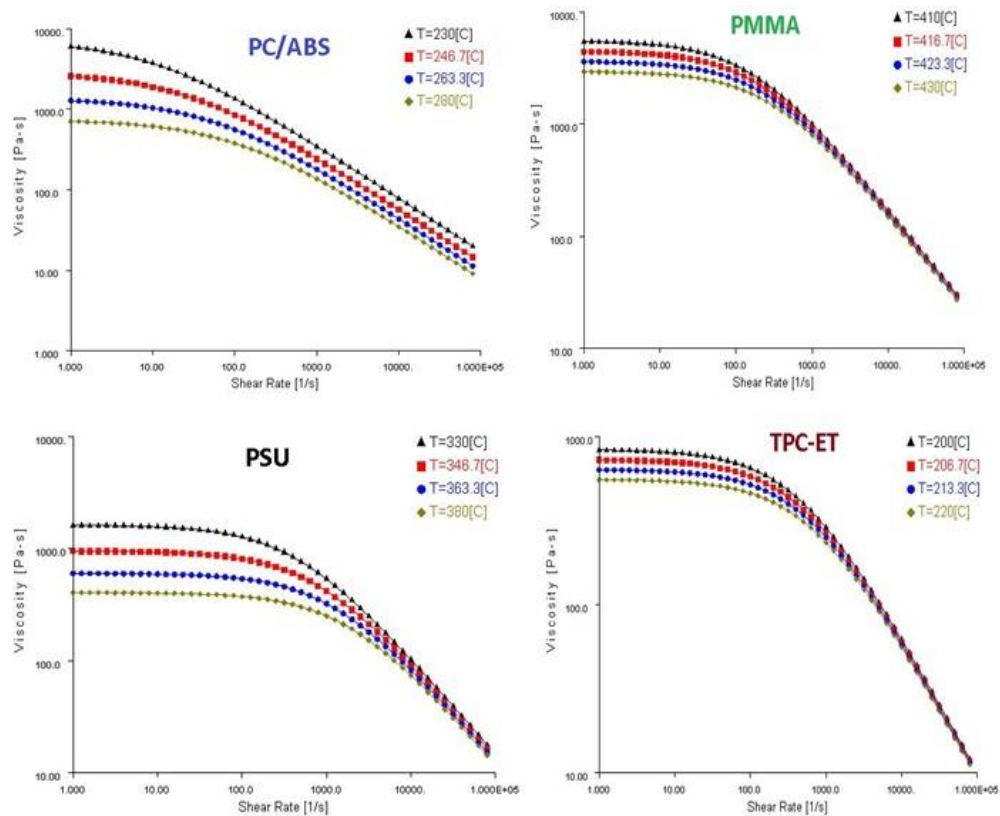


Fig. 6.4. Proprietăți reologice ale materialelor cu vâscozitate ridicată [Autodesk]

Analizând figura 6.3 putem spune că toate cele patru materiale utilizate au același comportament conform diagramelor la presiune constantă (50MPa) odată cu creșterea temperaturii de procesare avem și o creștere a volumului specific injectat. Pentru PC/ABS volumul de material crește lent până în jurul temperaturii de procesare de 140°C de unde se observă o creștere rapidă a acestuia. În cazul PSU această temperatură se situează în jurul temperaturii de 210°C, la TPC-ET este situată la aproximativ 95°C iar pentru PMMA aceasta se găsește în jurul valorii de

380°C. Din punct de vedere reologic la temperatură constantă cu cât viteza de deformare este mai mare cu atât vâscozitatea de material este mai ridicată.

Primul tip de rețea pentru care au fost realizate simulări de curgere este prezentată în figura 6.5. care prezintă timpul de umplere al acesteia, probabilitatea de umplere a regiunii piesei, viteza maximă de injectare respectiv temperatura frontului de curgere. Pentru această rețea de tip I ce are un diametru de 3mm și o lungime de 50mm se constată o umplere fără probleme a regiunii, având o viteză de forfecare de aproximativ  $530s^{-1}$ , iar injectarea fiind realizată într-un timp de 1,05 secunde.

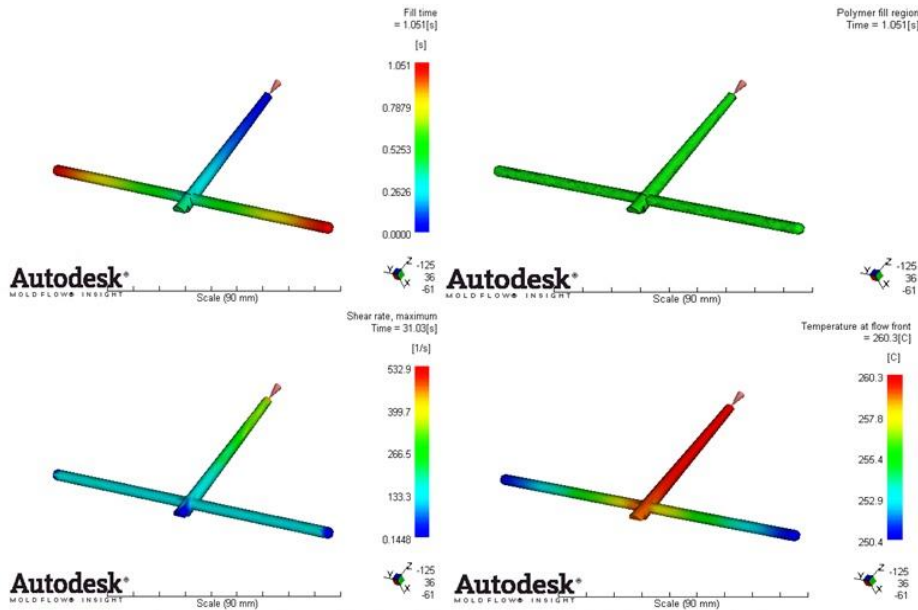


Fig. 6.5. Rezultate ale simulării de curgere privind rețeaua de tip I

Acest tip de rețea de formă I se utilizează în simulări conform tabelului 6.1 pentru diametre de curgere cuprinse în intervalul 3-2mm. Pentru realizarea acestor simulări din programul Autodesk MoldFlow au fost selectate cele patru materiale amintite anterior de vâscozitate ridicată destinate realizării studiului curgerii în rețele. Pentru fiecare material a fost aleasă temperatura medie recomandată pentru injectare, iar în cazul alegerii temperaturii matriței s-a optat pentru utilizarea unei valori puțin sub temperatura de tranziție vitroasă a materialului. [King, 2002] Pentru aceasta, din soft a fost activată tot timpul opțiunea de *mold thermal expansion* care este posibilitatea de extindere/amplificare a temperaturii matriței.

Pentru realizarea simulărilor de curgere prin rețele a mai fost utilizată și opțiunea de folosire a unei mașini de injectat. Astfel din baza de date a programului și conform cerințelor impuse la mașinile specifice pentru microinjectare a fost utilizată mașina de injectat a celor de la Arburg-Allrounder 220S. Mașina de injectat a fost selectată datorită diametrului melcului (15mm) și a forței maxime de închidere sub 20 de tone (15,4 tone). Aceste caracteristici prezentate pentru această mașină de injectat precum și alte proprietăți ale acesteia pot fi extrase din ANEXA 3.3. Acastă anexă prezintă o serie de mașini de injectat sub 50 de tone care au un diametru al melcului cuprins între 14-25mm. De regulă mașinile destinate

injectării pieselor prin microinjectare sunt mașini cu un melc cu diametrul sub 20mm. O altă caracteristică utilizată la simulările pentru aceste rețele a fost utilizarea unui timp de răcire a piesei de 20 de secunde.

Tabel 6.1

Diam rețea [mm]	Lungime max. rețea [mm]	Material	Timp de injectare [s]	Temp. topiturii [°C]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Timpul ciclului de injectare [s]
3	50	PC/ABS	1,051	264,9	532,9	31
3	50	PMMA	0,6747	427,5	701,7	30,7
3	50	PSU	1,581	354,3	330,3	31,56
3	50	TPC-ET	1,554	212,4	296,5	31,53
2,9	48	PC/ABS	1,052	264,6	894,9	29,8
2,9	48	PMMA	1,373	246,8	695,2	31,35
2,9	48	PSU	1,475	353,4	627,6	31,45
2,9	48	TPC-ET	1,457	212	638,7	31,43
2,8	46	PC/ABS	1,053	264,9	542,3	31,15
2,8	46	PMMA	0,7405	424,3	781,9	30,73
2,8	46	PSU	1,479	354,5	414	31,45
2,8	46	TPC-ET	1,553	212,5	400,8	31,53
2,7	43	PC/ABS	1,054	264,8	1057,7	31,04
2,7	43	PMMA	0,7419	423,6	1486	30,73
2,7	43	PSU	1,482	354,3	756,3	31,46
2,7	43	TPC-ET	1,455	212,3	751,8	31,43
2,6	42	PC/ABS	0,9492	265	599,2	30,93
2,6	42	PMMA	0,7431	424,1	688,4	30,73
2,6	42	PSU	1,485	355,2	317,6	31,46
2,6	42	TPC-ET	1,455	212,9	332,5	31,43
2,5	40	PC/ABS	0,9492	264,7	626,2	30,93
2,5	40	PMMA	0,7407	424,3	813,9	30,73
2,5	40	PSU	1,484	354,5	397,4	31,46
2,5	40	TPC-ET	1,459	212	425,8	31,44
2,4	40	PC/ABS	0,9506	264,8	440,1	30,94
2,4	40	PMMA	0,7448	423,5	573,3	30,73
2,4	40	PSU	1,488	355,1	283,6	31,46
2,4	40	TPC-ET	1,456	212,2	285,8	31,43
2,3	38	PC/ABS	0,9507	264,8	482,3	30,94
2,3	38	PMMA	0,7462	423,7	647,4	30,73
2,3	38	PSU	1,382	355,1	339,2	31,36
2,3	38	TPC-ET	1,455	212,7	318,7	31,43
2,2	36	PC/ABS	0,9514	265,2	729,7	30,94
2,2	36	PMMA	0,7472	423,9	931,5	30,73
2,2	36	PSU	1,489	355,4	472,2	31,47
2,2	36	TPC-ET	1,456	212,7	472,5	31,44
2,1	34	PC/ABS	0,9503	288,8	543,7	30,94
2,1	34	PMMA	0,7478	461,5	600,9	30,73
2,1	34	PSU	1,488	383,6	325,1	31,46
2,1	34	TPC-ET	1,459	239,3	284,3	31,44
2	32	PC/ABS	0,9533	265,5	491,2	30,94
2	32	PMMA	0,7504	423,9	622,9	30,74
2	32	PSU	1,494	355,8	318,2	31,47
2	32	TPC-ET	1,459	212,8	317	31,44

Datorită utilizării unui asemenea timp de răcire se pot observa în tabel că majoritatea ciclurilor de injectare sunt peste 30 de secunde. Tot din acest tabel se poate observa faptul că timpul de injectare pentru diverse diametre ale rețelei în cazul aceluiaș material respectiv temperatura topiturii materialului au valori foarte apropiate. Dintre cele patru materiale utilizate se observă că cea mai eficientă soluție privind o umplere rapidă a cavității este oferită de Vespel CF 30NC (PMMA) produs de cei de la Du Pont Europe.

Pentru simulările cuprinse în intervalul diametrelor de 3-2mm pentru materiale cu vâscozitate ridicată algoritmul prezentat în capitolul V privind dimensionarea rețelelor sub 3mm este considerat fără cusur. Adică nu au existat simulări la aceste diametre la materialele propuse care să prezinte rezultate negative privind probabilitatea de umplere a piesei. Datorită rezultatelor pozitive obținute până în prezent se continuă cu simulările pentru rețele sub 2mm.

Astfel în figura 6.6 se prezintă tipul de rețea utilizat pentru diametrul de 1,9mm specifică injectării a trei piese simultan. Rețeaua este concepută ca fiind una cu o aranjare circulară în comparație cu cea utilizată anterior de tip radial.

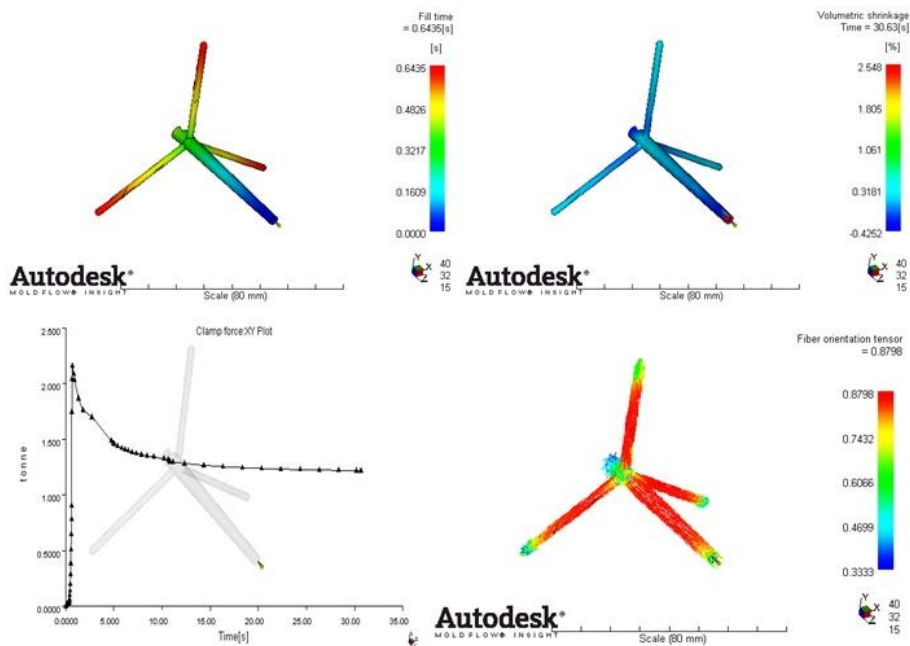


Fig. 6.6 Rețea de tip II pentru materialele cu vâscozitate ridicată

Se poate observa din figura respectivă că în urma simulării curgerii pentru acest diametru la această rețea timpul de umplere a fost de 0,6 secunde. De asemenea se evidențiază faptul că piesa rezultată poate avea o contracție maximă de 2,5% și o contracție minimă de 0,42%, cea finală depinzând de obicei de tipul de răcire ales (o răcire rapidă sau o răcire în matrice un timp determinat). În cele mai multe cazuri privind contracția materialului acesta se găsește în realitate undeva între cea maximă și cea minimă dintre cele pe care le prezintă softul.

Un alt rezultat al simulării realizate este diagrama dintre forța de închidere a matriței în funcție de timpul total de injectare. Cea mai mare forță necesară este undeva la 2,2 tone forță în primele 2-3 secunde ale injectării. După acest timp forța

de închidere scade lent în timp ajungând la sfârșitul ciclului de injectare până în jurul valorii de 1,15 tone. Un alt rezultat al simulării rețelei îl reprezintă orientarea fibrelor materialului la curgere, care așa cum este prezentat pune în evidență faptul că cea mai mare orientare o au fibrele în culoarea roșie iar orientarea cea mai mică o au cele evidențiate în albastru închis.

Tabelul 6.2. pune în evidență rezultatele majore obținute în cazul simulărilor acestui tip de rețea prezentat. Prin urmare diametrele utilizate ale rețelei sunt cuprinse între 1,9 și 1,5mm. Parametrii de injectare ca mașină de injectat, materiale alese din categoria celor cu vâscozitate ridicată sunt aceleași, temperaturile topiturii sunt aceleași iar temperatura matriței respectă deciziile impuse de la bun început. Din rezultatele obținute putem afirma că suntem în grafic privind dimensionarea rețelelor pentru microinjectare neexistând rezultate negative nici la acest tip de rețea la dimensiunile dorite. Ca și o observație privind comportarea materialului la curgere [Karlberg, 1989] putem afirma că tot PMMA-ul prezintă cele mai bune soluții privind timpul de injectare al piesei respectiv al ciclului de injectare. Următorul material după PMMA ce prezintă un bun timp de injectare îl reprezintă PC/ABS la o diferență de numai 2 sutimi. Dintre cele patru materiale utilizate până acum putem spune că cele mai nedorite rezultate privind timpul de injectare al piesei respectiv ciclul de injectare vin din partea materialului PSU oferit de firma BASF.

Tabelul 6.2

Diam rețea [mm]	Lungime max. rețea [mm]	Material	Timp de injectare [s]	Temp. topiturii [°C]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Timpul ciclului de injectare [s]
1,9	30	PC/ABS	0,8489	266,1	679,1	30,83
1,9	30	PMMA	0,6435	425,3	959,3	30,63
1,9	30	PSU	1,282	356,7	497,9	31,26
1,9	30	TPC-ET	1,252	213,5	427,5	31,23
1,8	29,8	PC/ABS	0,8476	266,3	659	30,83
1,8	29,8	PMMA	0,7522	423,9	697,1	30,74
1,8	29,8	PSU	1,388	356,9	377,8	31,36
1,8	29,8	TPC-ET	1,354	214,6	397,5	31,33
1,7	28	PC/ABS	0,8486	266	515,2	30,83
1,7	28	PMMA	0,7537	425,9	580,1	30,74
1,7	28	PSU	1,255	355,4	305,8	31,3
1,7	28	TPC-ET	1,355	213,8	325,7	31,34
1,6	27	PC/ABS	0,9561	267	556,2	30,94
1,6	27	PMMA	0,7544	424,8	613,5	30,74
1,6	27	PSU	1,5	372,8	326,9	31,47
1,6	27	TPC-ET	1,5	358,1	326,9	31,49
1,5	25	PC/ABS	0,9575	266,6	833,4	30,94
1,5	25	PMMA	0,7574	424,5	1060,7	30,74
1,5	25	PSU	1,611	357,5	500,7	31,59
1,5	25	TPC-ET	1,463	213,5	546,5	31,44

Următoarea rețea de injectat pentru care au fost realizate simulări de curgere cu materiale cu vâscozitate ridicată o reprezintă o rețea destinată umplerii simultane a cinci piese. Rețeaua este una de tip stea sau cu dispunere circulară a cuiburilor. De regulă acest tip de dispunere a pieselor (circulară) se preferă pentru matrițele cu plăci de tip disc dar se poate adapta și în cazul celorlalte tipuri de matrițe cu plăci dreptunghiulare. [Saxena, 2005], [Rotar\_b, 2010], [Șerban, 2011]

Figura 6.7. prezintă o serie de rezultate pentru simularea realizată pe acest gen de rețea de injectat. Se prezintă modul și probabilitatea de umplere cu material polimeric a rețelei dorite precum și densitatea piesei care este de cca 1,1 g/cm<sup>3</sup>. Figura prezintă presiunea la injectare a rețelei de unde se poate constata că în apropierea duzei presiunea este maximă în cazul nostru 43MPa, apoi scade până la 10 MPa în apropiere de jumătatea culeei și tinde la zero până la extremitățile rețelei.

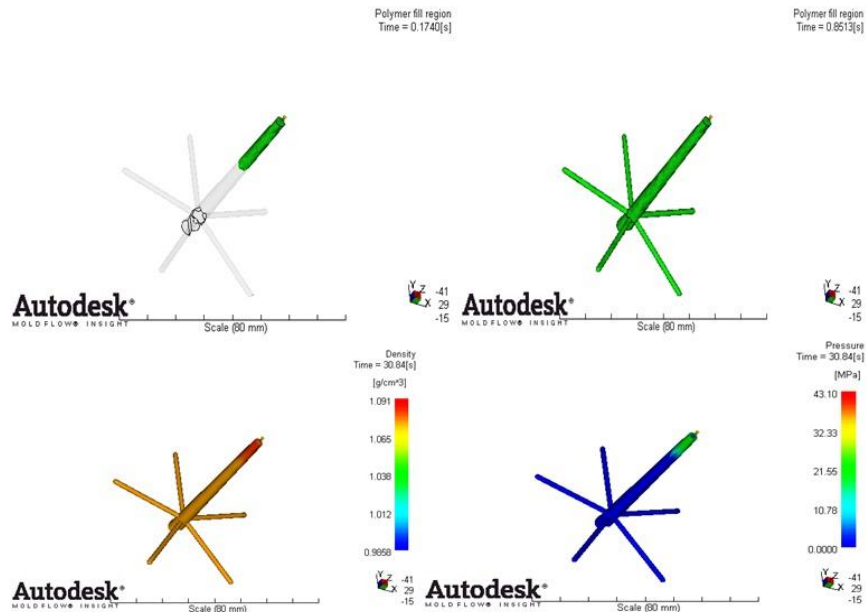


Fig. 6.7. Rezultate la simularea rețelei de tip stea

Pentru rețeaua de tip stea au fost realizate o serie de cinci simulări de curgere cu fiecare material ales din cele patru, încercările fiind realizate pentru diametre cu valoare de la 1,4-1mm. Pentru realizarea simulărilor datele de intrare sunt cele stabilite de la începutul realizării primei simulări prin urmare acestea rămân nemodificate și în acest caz. Rezultatele obținute la aceste simulări sunt prezentate în tabelul 6.3. și se constată din acesta că nu există erori la umplerea pieselor ceea ce face ca algoritmul realizat pentru rețelele de microinjectare să fie considerat satisfăcător până în acest moment.

Tabelul 6.3.

Diam rețea [mm]	Lungime max. rețea [mm]	Material	Timp de injectare [s]	Temp. topiturii [°C]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Timpul ciclului de injectare [s]
1,4	22	PC/ABS	0.8513	266,1	973,4	30,84
1,4	22	PMMA	0,6471	423,6	643,6	30,63
1,4	22	PSU	1,288	356,7	349,9	31,27
1,4	22	TPC-ET	1,253	212,9	347,4	31,23
1,3	21	PC/ABS	0,8488	266,3	751,4	30,84
1,3	21	PMMA	0,6471	424	753,6	30,63
1,3	21	PSU	1,411	358,3	540,4	31,39
1,3	21	TPC-ET	1,355	213	436,9	31,34



1,2	19,2	PC/ABS	0,9611	267	820,5	30,95
1,2	19,2	PMMA	0,6496	424	1216,5	30,64
1,2	19,2	PSU	1,510	358	431,2	31,49
1,2	19,2	TPC-ET	1,360	213,4	585,1	31,34
1,1	17,1	PC/ABS	1,068	267,8	917,7	31,05
1,1	17,1	PMMA	0,6504	426,2	1201,8	30,64
1,1	17,1	PSU	1,726	358,9	557,4	31,70
1,1	17,1	TPC-ET	1,567	214,3	599,9	31,55
1	15	PC/ABS	1,180	269,3	1353,6	31,16
1	15	PMMA	0,6487	425,8	2014,4	30,64
1	15	PSU	2,070	361,3	668	32,03
1	15	TPC-ET	1,776	214,8	705,1	31,75

În urma rezultatelor obținute putem afirma încă o dată că cele mai bune rezultate privind umplerea acestui tip de rețea utilizată îl oferă materialul PMMA al celor de la Du Pont iar cea mai proastă alegere în acest sens îl reprezintă materialul PSU care este fabricat de cei de la BASF.

Următorul tip de rețea utilizată este una de tip H concepută pentru injectarea a patru piese simultan. La acest tip de rețea canalul de distribuție principal are un diametru de 1.5mm-1.2mm în funcție de canalul de distribuție secundar care este de fapt diametrul rețelei din tabel. Figura 6.8 reprezintă acest tip de rețea în diverse ipostaze.

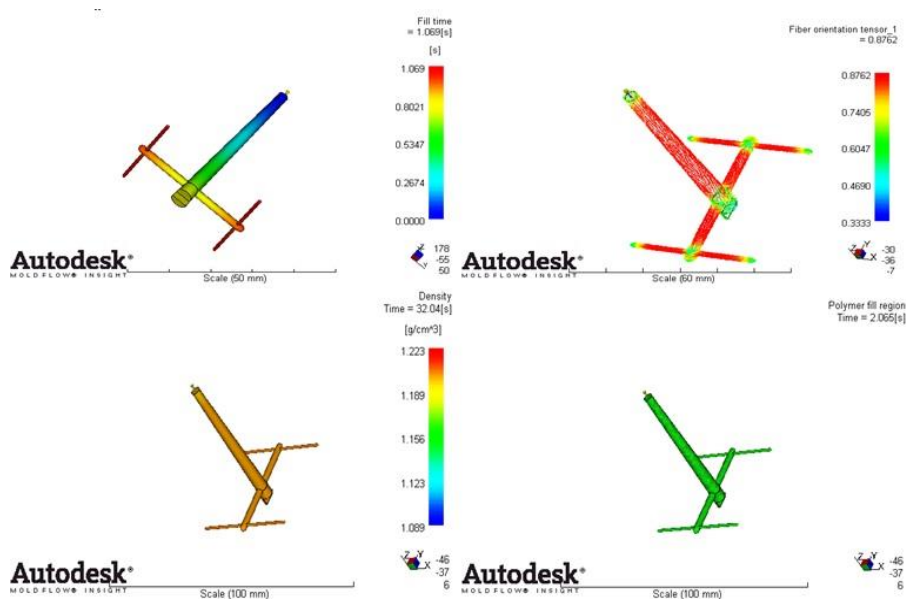


Fig. 6.8. Rețea de tip H destinată simulărilor cu materiale cu vâscozitate ridicată

Din figura 6.8 ce reprezintă rețeaua de tip H putem observa un timp de umplere al acesteia în cca. 1 secundă, modul de orientare al fibrelor materialului la curgere și densitatea materialului. În cazul orientării fibrelor se observă ca cea mai slabă orientare a materialului se prezintă în regiunea extractorului de culee, la extremitățile rețelei și în cazul proeminenței cold slug acolo unde se întâlnesc două canale de distribuție. O altă imagine a figurii prezintă faptul că piesa dorită se umple

fără prea mari dificultăți dar într-un timp de 2 sec. de această dată de unde putem realiza faptul că pentru cele două umpleri au fost utilizate materiale diferite.

Rezultatele simulărilor pentru acest tip de rețea sunt redată în tabelul 6.4. care are ca diametre de încercat pe cele cuprinse în intervalul 0,9-0,5mm. Cu aceleaș date de intrare utilizate privind materialele alese, mașina de injectat și alți parametrii privind buna desfășurare a procesului curgerii se constată că de această dată există o eroare privind umplerea piesei. Acest fapt se întâmplă în cazul materialului PSU la un diametru al rețelei de 0,5mm. Deoarece materialele rămase au arătat că rețeaua utilizată poate fi umplută experimentele privind simulările de curgere nu se opresc aici și vor continua cu precizarea că se modifică designul rețelei pentru următoarele încercări de simulare de curgere.

Tabelul 6.4.

Diam rețea [mm]	Lungime max. rețea [mm]	Material	Timp de injectare [s]	Temp. topiturii [°C]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Timpul ciclului de injectare [s]
0,9	12	PC/ABS	1,069	268,2	1344,5	31,06
0,9	12	PMMA	0,5499	424,8	2635,2	30,54
0,9	12	PSU	2,065	360,5	722,5	32,04
0,9	12	TPC-ET	2,524	214,4	749,8	32,50
0,8	12	PC/ABS	1,074	269,2	1957,8	31,06
0,8	12	PMMA	0,5572	424,6	4171,6	30,53
0,8	12	PSU	2,080	362	1000	32,05
0,8	12	TPC-ET	3,062	215,1	821,1	33,02
0,7	11	PC/ABS	1,082	268,7	1869,6	31,05
0,7	11	PMMA	0,5435	424,6	3607,5	30,53
0,7	11	PSU	2,061	360,1	1041,1	32,03
0,7	11	TPC-ET	3,735	214,3	725,8	33,65
0,6	9	PC/ABS	1,093	268,8	3071,8	31,05
0,6	9	PMMA	0,5652	425,9	5667,9	30,54
0,6	9	PSU	2,235	362,5	1535,1	32,15
0,6	9	TPC-ET	3,747	217,2	1076,2	33,66
0,5	7,5	PC/ABS	1,229	268,5	4431,3	31,16
0,5	7,5	PMMA	0,4443	433	12488	30,43
0,5	7,5	PSU	5,784	360,4	1779,9	32,01
0,5	7,5	TPC-ET	3,366	214,8	2186,2	33,22

Pentru simulările de curgere privind diametrele de 0,4mm respectiv 0,3mm a fost utilizată o rețea de tip H cu un canal de distribuție principal și două canale de distribuție secundare. O asemenea rețea utlizată în studiul curgerii este reprezentată în figura 6.9 și este destinată umplerii a opt cuiburi simultan.

Imaginile din figură sunt reprezentative, acestea prezentând informații diverse cu privire la rezultatele unor simulări obținute cu acest tip de rețea. Figura prezintă în unul dintre cazurile prezentate o umplere a rețelei în mai puțin de o secundă în comparație cu o probabilitate de umplere nereușită de aproximativ patru secunde. În figură există o imagine reprezentativă care prezintă o umplere eșuată sau o cavitate neumplută. Pe lângă această comparație între a se umple și a nu se umple rețeaua simulată, există distribuția sau orientarea fibrelor materialului polimeric, vâscozitatea de material pentru un ciclu de injectare de 30sec și viteza maximă de forfecare pentru un material. Tabelul 6.5. prezintă rezultatele simulărilor realizate în acest sens eșecurile simulărilor fiind clar evidențiate.

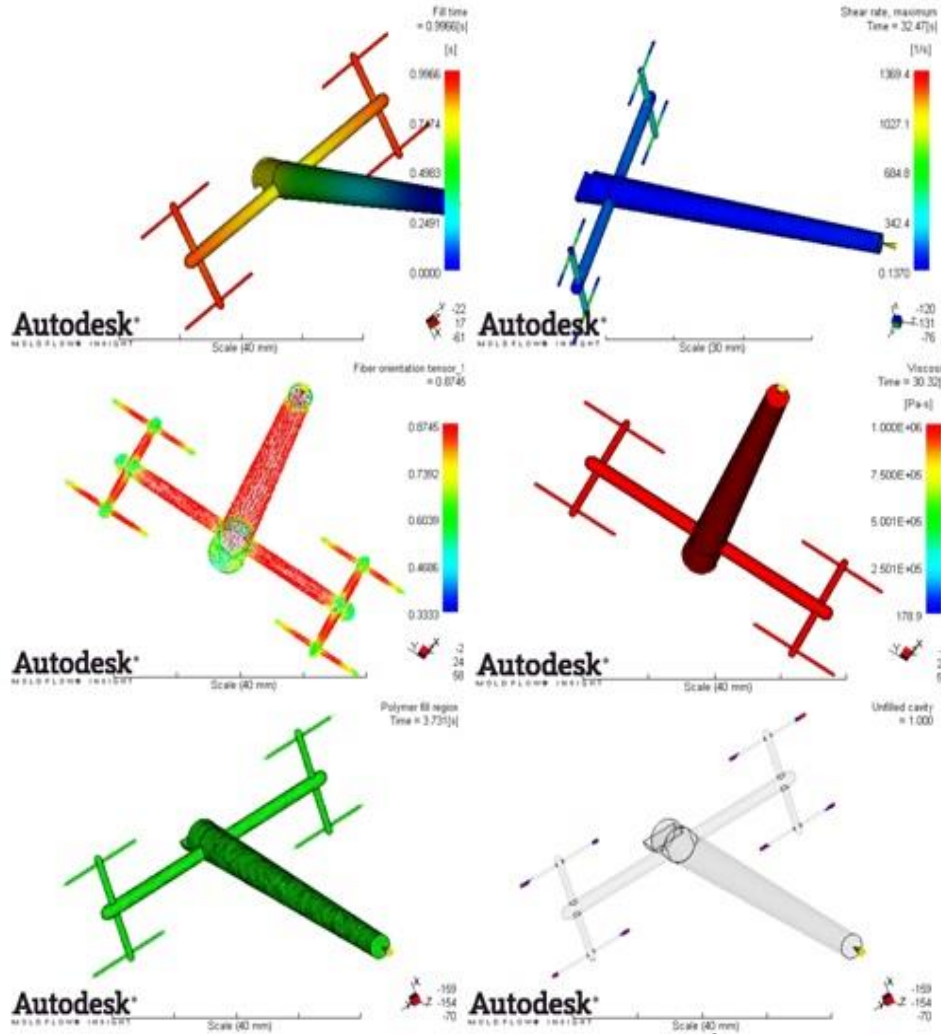


Fig.6.9. Rețea de tip H pentru opt cuiburi

Tabelul 6.5

Diam rețea [mm]	Lungime max. rețea [mm]	Material	Timp de injectare [s]	Temp. topiturii [°C]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Timpul ciclului de injectare [s]
0,4	5,5	PC/ABS	0,9966	266,5	5562,8	30,94
0,4	5,5	PMMA	0,3343	434,9	8584,3	30,32
0,4	5,5	PSU	3,731	356,6	3392,2	31,69
0,4	5,5	TPC-ET	2,881	212,6	1369,4	32,47
0,3	4,3	PC/ABS	1,643	265,7	6187,7	30,93
0,3	4,3	PMMA	0,3414	435,8	13839	30,32
0,3	4,3	PSU	3,310	356,6	7203,9	31,26
0,3	4,3	TPC-ET	3,845	213,8	2642,6	31,85

În urma analizării rezultatelor din tabel se constată că pentru o rețea cu un diametru de 0,3mm a cedat și materialul PC/ABS pe lângă materialul PSU privind umplerea cavităților. Chiar dacă dintre cele patru materiale inițiale alese să fie utilizate în cadrul acestor experimente de simulare de umplere a cavităților au rămas doar două simulările vor continua pentru diametrele de 0,2 și 0,1mm.

Ultimul tip de rețea folosită la simularea materialelor cu vâscozitate ridicată folosită în cazul diametrelor de 0,2mm respectiv 0,1mm este tot o rețea de tip H dar combinată astfel încât este destinată umplerii a 16 cuiburi. În figura 6.10 se prezintă un astfel de tip de rețea iar tabelul 6.6 prezintă rezultatele simulărilor de curgere prin rețea specifice diametrelor de 0,2 și 0,1mm.

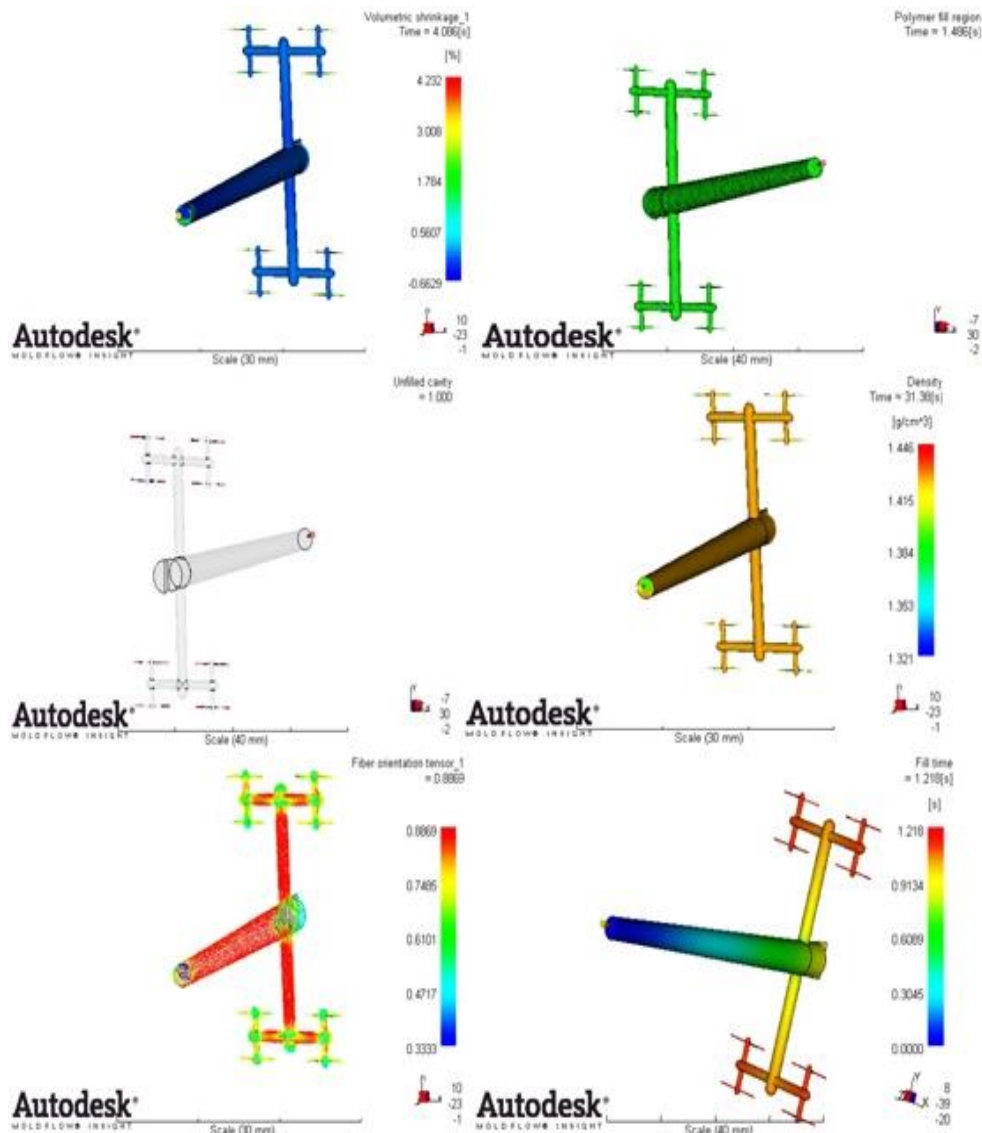


Fig. 6.10. Rețea pentru umplerea a 16 repere

Figura prezintă diverse rezultate din simulările de curgere în ceea ce privește ultimile dimensiuni ale tabelului propus pentru microinjectare. Dintre acestea putem aminti probabilitatea de umplere a piesei cu material, timpul de injectare sau umplere, modalitatea de orientare a fibrelor materialului polimeric contracția materialului și eșecul în ceea ce privește umplerea cavității.

Dacă am amintit despre eșecul în ceea ce privește umplerea cavității acest lucru este făcut pe drept din considerente de etică în ceea ce privește materialele rămase să umple cavitatea matriței din cele patru inițiale. La diametrul de 0.2mm următorul material care a intrat în familia celor care nu mai fac față umplerii cavităților de matriță la aceste dimensiuni este PMMA. Poate să pară ciudată această afirmație datorită faptului că în majoritatea simulărilor realizate până în acest punct materialul în cauză a dat cele mai bune soluții și rezultate la simulare.

Tabelul 6.6.

Diam rețea [mm]	Lungime max. rețea [mm]	Material	Timp de injectare [s]	Temp. topiturii [°C]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Timpul ciclului de injectare [s]
0,2	3	PC/ABS	1,486	280	5168,8	30,94
0,2	3	PMMA	1,580	433,7	2094,1	31,38
0,2	3	PSU	6,342	369,9	849,9	33,85
0,2	3	TPC-ET	1,218	218,5	5049,2	31,13
0,1	2,5	PC/ABS	1,486	280	5168,8	30,94
0,1	2,5	PMMA	1,580	433,7	2094,1	31,38
0,1	2,5	PSU	6,342	369,9	849,9	33,85
0,1	2,5	TPC-ET	1,218	218,5	5049,2	31,13

Figura 6.11 prezintă un chart în care se evidențiază cel mai bun timp de injectare obținut pentru fiecare dintre cele patru materiale utilizate în simulările pentru rețele. Timpul a fost selectat pentru aceste materiale pentru diametrele mai sus amintite din 0.5 în 0.5mm.

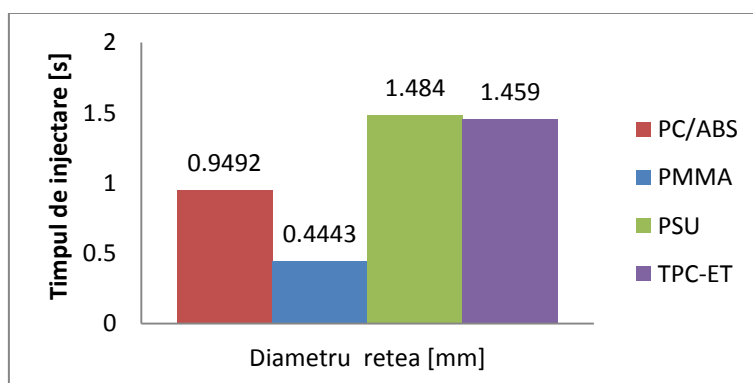


Fig. 6.11. Cel mai mic timp de injectare pentru materialele utilizate

Conform figurii prezentate se observă că dintre materialele cu vâscozitate ridicată materialul PMMA prezintă cel mai scurt timp de injectare a rețelelor. În contradicție cu acesta se situează materialul PSU care este primul ce nu va mai umple cavitatea matriței. Pentru a observa modul de evoluție al timpului de injectare sau umplere a cavităților în cazul celor patru materiale cu vâscozitate

ridicată pentru simulările destinate rețelelor de microinjectare se observă în figura 6.12 un exemplu de grafic specific. Din graficul prezentat se poate observa faptul că materialele se pot comporta diferit din punct de vedere al timpului de injectare în funcție de diametrul rețelei. Astfel pentru primul material utilizat în realizarea simulărilor se poate observa că timpul de injectare pornește de la valoarea de 1s la diametrul de 3mm după care scade și apoi crește ajungând în cazul diametrului rețelei de 0.5mm la o valoare de 1,2s. Pentru PMMA lucrurile stau exact invers în comparație cu PC/ABS și se observă că de la primul timp căruia îi corespunde diametrul de 3mm și până la timpul corespunzător diametrului de 0.5mm curba graficului prezintă o creștere ușoară după care scade.

Pentru PSU curba de timp prezintă o ascendență ușoară în intervalul 3-1mm după care o creștere bruscă a timpului până aproape de 6s. Acesta este momentul în care acest material cu vâscozitate ridicată devine inutil pentru experimentele care se succed. Ultimul material ales pentru realizarea simulărilor de curgere specifice rețelelor este TPC-ET pentru care curba de timp este asemănătoare cu materialul prezentat anterior cu deosebirea că aceasta scade ușor în intervalul diametrelor cuprinse între 3-2mm după care se observă o creștere ușoară până la 1mm iar apoi curba crește mai rapid până la diametrul de 0.5mm. La acest material dacă s-ar fi prezentat curba de timp până în cazul diametrului rețelei de 0.1mm ar fi fost observată o descreștere a acesteia de la 3,3s până la 1,2s.

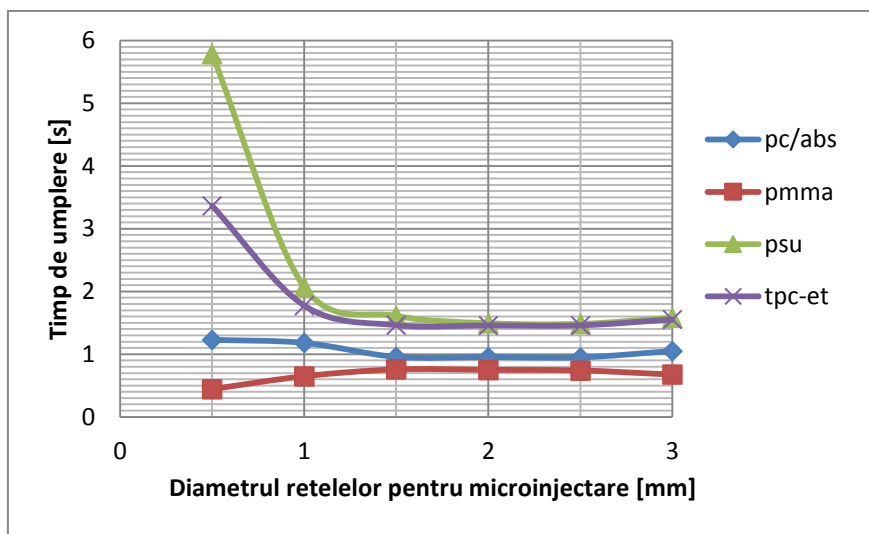


Fig. 6.12. Evoluția timpului de umplere funcție de diametrul rețelei

Dintre cele patru materiale cu vâscozitate ridicată selectate de la bun început în realizarea simulărilor și a studiului curgerii unul singur a rămas în final să îndeplinească toate cerințele impuse. Acesta este **Hytrel 3078 (TPC-ET)** realizat de firma **Du Pont Europe** și prezintă conform rezultatelor tabelare aceleași caracteristici de injectare și în cazul simulării diametrului rețelei de 0,2mm și în cazul celui de 0.1mm.

În concluzie putem afirma fără exagerare faptul că tabelul realizat pentru diametrele specifice microinjectării și algoritmul utilizat (progresia aritmetică folosită cu rația de 3,33) sunt concepute eficient iar rezultatele obținute în urma simulărilor realizate (cca. 98,9% rezultate pozitive privind umplerea reperului utilizat) dau o

validitate fără echivoc conceptului propus privind rețelele de microinjectare. Acest fapt este un lucru îmbucurător și se dorește realizarea simulărilor de curgere pentru rețelele de injectat specifice materialelor cu vâscozitate scăzută pentru a observa dacă algoritmul prezentat este valabil și în acest caz.

Conform ANEXEI 6.1. care prezintă un număr de 63 de materiale diferite aparținând unui număr de 20 de tipologii de polimeri au fost selectate șase pentru a se realiza simulările specifice rețelelor de injectat pentru materiale cu vâscozitate scăzută. Cele șase materiale ce prezintă o vâscozitate scăzută selectate în vederea realizării simulărilor sunt: **ABS 330** (ABS) produs de firma *Techno Polymer*, **Minlon 73M40 NC010** (PA6) realizat de *Du Pont Europe*, **Ultradur B 2550** (PBT) al celor de la *BASF*, **Keyflex BT1163D BK** (PE) produs de cei de la *Du Pont Europe*, **Petra 130** (PET) realizat de cei de la firma *BASF* respectiv **Delrin 100 NC010** (POM) produs de *Du Pont Europe*. Pentru materialele polimerice cu vâscozitate scăzută prezentate sunt evidențiate proprietățile reologice și diagrama PVT în ANEXA 6.2.

Primele diagrame prezentate în Anexa 6.2 evidențiază proprietățile reologice ale celor șase materiale alese prin viteza de deformare în funcție de vâscozitatea materialului. Din aceste diagrame se poate concluziona că odată cu creșterea vitezei de deformare crește și vâscozitatea de material. La aceste materiale cu vâscozitate scăzută se constată conform diagramelor că materialul ABS prezintă o diferență mare a vâscozității între temperaturile extreme de procesare în comparație cu POM-ul care prezintă o diferență mică de vâscozitate la temperaturile extreme de procesare.

În privința diagramelor de tip PVT putem afirma că toate cele șase materiale cu vâscozitate redusă prezintă la o presiune constantă, la o creștere a temperaturii de procesare o creștere a volumului de material injectat. Pentru materialul ABS la o presiune de 50MPa se observă că până la temperatura de 120°C volumul de material crește lent iar după această temperatură volumul de material prezintă o creștere rapidă. Pentru materialul PA6 la aceeași presiune utilizată volumul de material crește vertiginos din jurul valorii temperaturii de 185°C. Materialul PBT prezintă la aceeași presiune o creștere rapidă a volumului de material injectat până în jurul valorii de 220°C după care urmează o creștere lentă până în jurul valorii de 270°C urmând ca după această temperatură volumul de material să crească iarăși rapid. Polietilena reprezintă următorul material utilizat în simulări și prezintă ca temperatură de tranziție între o creștere rapidă și una lentă a volumului de material injectat aceea cu valoarea de 165°C. Pentru materialul PET ales volumul de material injectat crește rapid până în jurul temperaturii de 240°C, după care prezintă o creștere lentă până la 270°C urmată de o creștere rapidă. În cazul ultimului material selectat care este POM se constată că, la presiunea de 50MPa volumul de material injectat prezintă o creștere rapidă până în jurul temperaturii de 150°C de unde creșterea se accentuează și devine mai rapidă.

Primul tip de rețea și nu numai pentru care au fost realizate simulări de curgere privind utilizarea materialelor polimerice cu vâscozitate scăzută este prezentată în figura 6.13. Figura prezintă probabilitatea de umplere a rețelei de injectat de tip I, vâscozitatea pentru o rețea de tip X, rata de extensie pentru o rețea de tip X destinată umplerii a opt cuiburi simultan respectiv probabilitatea de umplere pentru o rețea de tip stea destinată umplerii simultane a șase cuiburi.

Rețelele de injectat specifice pentru microinjectare specifice materialelor cu vâscozitate scăzută sunt cele prezentate în figura 5.10 a capitolului V. Astfel au fost utilizate cele șase materiale în realizarea de simulare de curgere pentru care s-au selectat temperatura materialului, temperatura matriței la o valoare apropiată temperaturii de tranziție vitroasă a materialului utilizat, un timp de răcire de 10s



respectiv alegerea unei mașini de injectat din baza de date a softului cu un piston care să aibă un diametru de 15mm. Pentru toate rețelele a fost necesar repararea **meshului** și generarea acestuia în **dual-domain** respectiv în 3D, proces de lungă durată. În urma discretizării s-a urmărit ca în 3D **aspect ratio** să fie în jurul valorii lui 6 sau chiar mai mic, motiv pentru care au fost luate măsurile necesare.

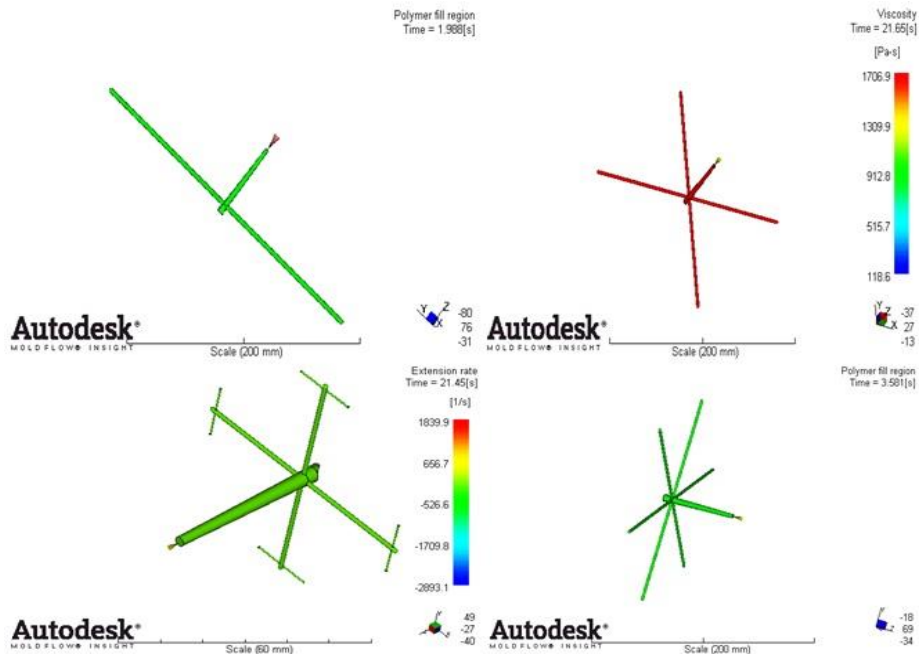


Fig. 6.13. Rețele specifice studiului curgerii materialelor cu vâscozitate scăzută

Rezultatele simulărilor de curgere realizate pentru materiale cu vâscozitate scăzută sunt redată în tabelul prezentat la ANEXA 6.3.

Figura 6.14 prezintă un grafic din care se evidențiază care este cel mai mic timp de injectare pentru diametrele de rețele cuprinse în intervalul 3-0.5mm. Prin urmare au fost utilizate diametre de rețea cu o diferență din 0.5 în 0.5 între valorile amintite mai sus. Din diagrama existentă în figură se poate observa faptul că primul material cu vâscozitate scăzută care poate umple fără probleme cavitatea matriței este PET. Materialul prezintă un timp minim de umplere al rețelelor de 0.4sec și se situează astfel pe primul loc în cazul materialelor cu vâscozitate scăzută la umplerea rețelelor pentru microinjectare. Un alt material care poate umple fără probleme cavitatea matriței în acest caz îl reprezintă ABS cu un timp minim de 0.75sec. De asemenea și materialul PBT se prezintă bine la capitolul posibilitate de injectare a rețelelor destinate microinjecției ocupând un loc trei pe podiumul materialelor cu vâscozitate scăzută capabile să umple cavitățile matriței dorite. Polietilena reprezintă ultimul material din această familie de materiale cu vâscozitate scăzută care are posibilitatea umplerii cavităților de matriță și care prezintă un timp de injectare minim de 1,15sec.

Materialul cu cea mai mare problemă privind umplerea cavităților dorite sau cu fluiditatea cea mai redusă o reprezintă POM. Acesta are un timp minim de umplere a cavităților situat în jurul valorii de 2,3sec iar de la diametrul rețelei de

0.5mm nu mai poate satisface condiția de umplere a cavității. Prin urmare acesta este primul material cu vâscozitate scăzută care cedează la fel cum a cedat PSU în cazul simulărilor materialelor cu vâscozitate ridicată. Următorul material care nu mai poate îndeplini condiția de umplere a matriței îl reprezintă PA6 pentru care timpul minim de injectare este în jurul a 1,3sec. Acesta nu mai poate să satisfacă condițiile de umplere a matriței începând cu diametrul rețelei de 0.3mm.

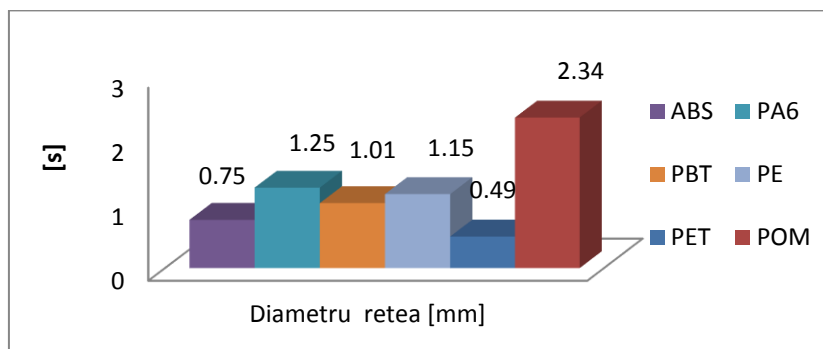


Fig 6.14 Timpul minim de injectare pentru materiale cu VS

În figura 6.15 se prezintă evoluția timpului de injectare în funcție de diametrul rețelei utilizate. Pentru materialul ABS timpul crește în cazul diametrului cuprins între 3-2,5mm după care scade până la diametrul rețelei de 1mm iar apoi începe să crească din nou. Pentru PA6 curba de timp scade rapid de la un diametru al rețelei de 3mm până la 1.5mm după care se constată o creștere ușoară a timpului de injectare. Materialul PBT prezintă o scădere lentă a timpului de injectare în funcție de scăderea diametrului rețelei de injectat. Despre polietilenă putem afirma faptul că, curba de timp se comportă sinusoidal cu o alternanță lentă de urcări și coborâri pe scara timpului. PET-ul prezintă pe scara timpului o coborâre lentă de la diametrul de 3mm până la cel de 1mm după care începe să crească lent. Ultimul material cu care au fost realizate simulări este POM iar acesta prezintă o creștere a timpului de injectare între diametrul rețelei de 3-2.5mm după care timpul scade până la diametrul de 1mm și apoi urcă rapid, materialul eșuează în umplerea cavității matriței în acest stadiu.

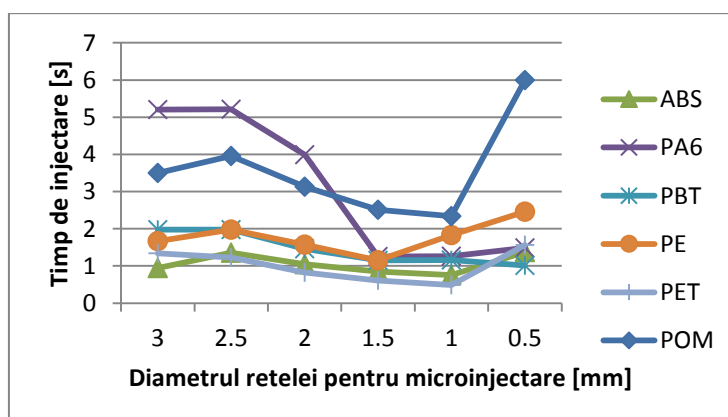


Fig 6.15 Evoluția timpului de umplere funcție de diametrul rețelei

#### 6.4.2. Simularea curgerii în cazul modelelor referențiale în mediul de simulare Autodesk Moldflow

În urma simulărilor realizate pe rețelele de injectare de dimensiuni specifice procesului de microinjectare pe materiale cu vâscozitate diferită se constată o serie de rezultate pozitive ce dau un impuls pozitiv autorului să își îndrepte atenția spre lucruri mai serioase, practice din domeniul uzinal.

Acum se conturează ideea realizării unor simulări de curgere pentru piese și modele ce pot să se găsească în diverse domenii și pentru care procesul specific de obținere este microinjectarea. Așa cum se prezentau în capitolul V (subcapitolul 5.5) acele modele referențiale proiectate din diverse domenii nu au fost realizate doar așa, pentru un design cât mai plăcut al lucrării de față ci cu un scop bine determinat, acela de a realiza simulări de curgere utilizând materiale cu vâscozitate diversă în diferite domenii. S-a realizat o metodologie proprie de lucru în acest sens prin faptul că au fost propuse simulări cu materiale diferite pe aceeași piesă respectiv s-au realizat simulări de curgere a mai multor piese simultan utilizând unul sau mai multe puncte de injectare.

Primul model referențial pentru care au fost realizate simulări de curgere este piesa de tip nasture din industria vestimentară care prezintă o greutate de 0,02grame. Pentru această piesă în cadrul simulărilor de curgere au fost utilizate următoarele materiale PE **Keyflex BT 1163D BK** comercializat de *Du Pont Europe*, ABS **Techno MUH E7301** de la firma *Techno Polymer*, PMMA **Vedril 7** realizat de firma italiană *Montedison (Montepolimeri & Vedril)*, HIPS **Polystyrol 2710** fabricat de la cei de la *BASF*, LCP **Vectra B230** de la *Ticona* din USA, PP **Niplene F 30 HF** de la firma italiană *SolediItaly* și SAN **Luran 358 N** comercializat de *BASF*.

Pentru materialele alese au fost selectate o serie de rezultate care pot fi vizualizate în tabelul 6.7. Dintre cele opt materiale din tabel se poate observa faptul că dintre materialele alese cea mai bună soluție o reprezintă SAN din punct de vedere al punctului de injectare. De asemenea se poate observa faptul că trei dintre materialele alese prezintă același timp al ciclului de injectare iar cel mai rezistent reper în urma injectării îl reprezintă cel din PMMA.

Tabelul 6.7

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
PE	0,7215	469,8	250	20,71	253,3
ABS	0,2064	1634,4	250,4	20,20	254,9
PMMA	0,2053	1659,2	240,2	20,20	243,4
HIPS	0,3085	1073,9	220,1	20,30	223,2
LCP	0,9090	359,1	295	20,90	296,6
PP	0,4096	755,8	230	20,41	232,4
SAN	0,2047	1601,6	230,2	20,20	232,7
PE/4cuib	5,926	911,7	250,1	25,86	251,6

Figura 6.16 prezintă o serie de rezultate privind umplerea modelului realizat cu materiale cu vâscozitate scăzută. Figura prezintă densitatea de material, un timp de umplere al unei piese simple, probabilitatea de umplere, presiunea și orientarea fibrelor pentru un singur reper. În cazul umplerii celor patru repere se prezintă timpul de solidificare și temperatura frontului de curgere.

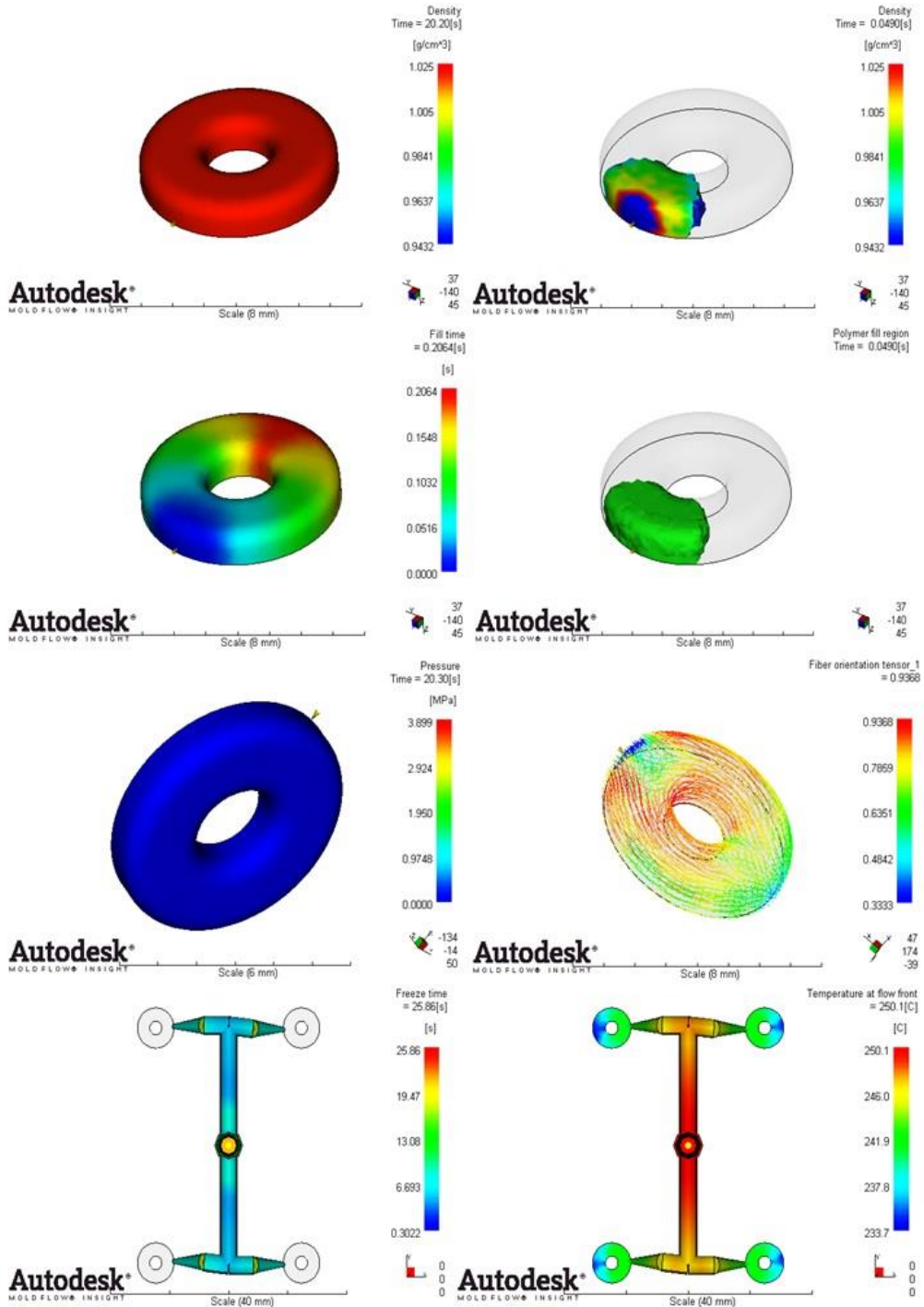


Fig. 6.16. Rezultate pentru piesa de tip nasture

Un alt model din industria vestimentară îl reprezintă o piesă simplă care este un accesoriu pentru încălțăminte sport. Pentru acest tip de reper au fost utilizate următoarele materiale în scopul studiului curgerii PA6 **Ultramid 8202** fabricat de *BASF*, POM **Ultraform H4320** de la *BASF*, TPO **Hifax CA53A** realizat de firma *Basell Polyolefines Europe*, PP **Latene 7 TR-V2** comercializat de *Lati Industria Termoplastici SPA*, HDPE **Eraclene MM74** realizat de cei de la *Polimeri Europa* și PCT **Thermix CG933** fabricat de *Du Pont Engineering Polymers*.

Rezultatele în urma simulărilor sunt introduse în tabelul 6.8. de unde se pot trage următoarele concluzii-cel mai bun timp de injectare din materialele utilizate îl prezintă HDPE a cărui timp de injectare al reperului este de 0.41s în comparație cu POM care poate umple reperul dorit în 4,1s. Ciclul de injectare este mai scurt la acest prim material în comparație cu celelalte.

Tabelul 6.8

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
PA6	0,7173	382,4	265	20,71	267,6
POM	4,126	88,14	200,1	24,08	201,8
TPO	0,7303	936,3	205,1	20,72	208,1
PP	1,341	906,7	195	21,33	196,5
HDPE	0,4147	988,8	230,2	20,41	233,2
PCT	1,733	667,7	300	21,72	301,7

De asemenea din punct de vedere al vitezei de forfecare se constată că valoarea cea mai mare se înregistrează în cazul materialului HDPE iar valoarea cea mai mică pentru aceasta este în cazul materialului POM.

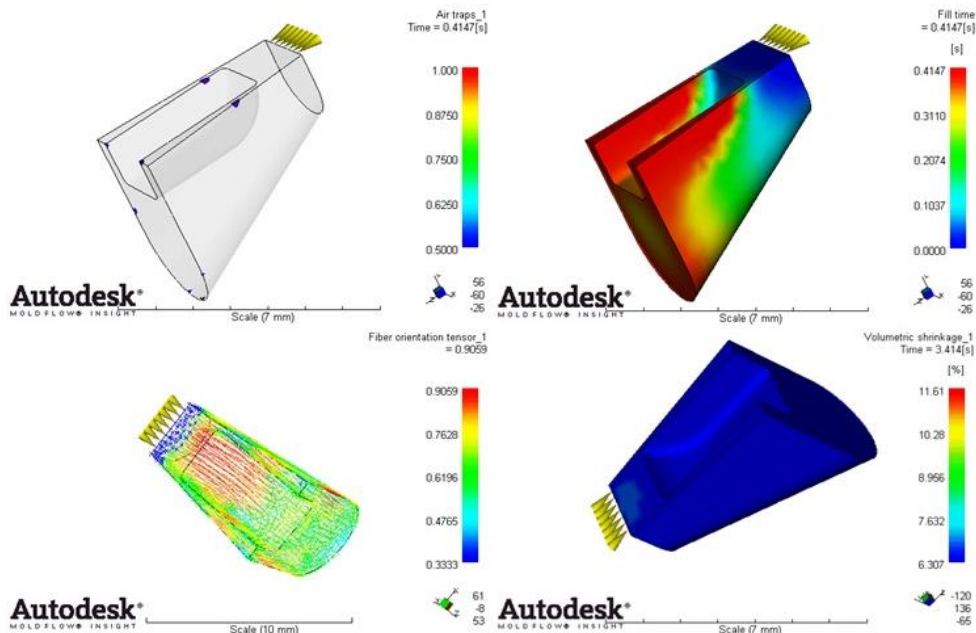


Fig.6.17. Rezultate pentru piesa simplă

Figura 6.17 prezintă o serie de rezultate din simulările de curgere realizate pe acest tip de piesă și se evidențiază faptul că s-au utilizat mai multe puncte de injectare pentru acest reper. Astfel această piesă poate fi injectată cu un dig pelicular sau evantai ceea ce duce la o probabilitate mai mare de umplere. Figura prezintă goluri de aer care sunt aproape insesizabile, un timp de umplere de 0,4secunde, o contracție a materialului cuprinsă între 6-11% și modul de orientare al fibrelor de material la injectare.

Ultimul model referențial ce aparține industriei articolelor de îmbrăcăminte și încălțăminte mai ales, îl reprezintă articolul de tip toc pentru pantof. Această piesă are o greutate de doar 0,04grame iar materialele utilizate în cadrul simulărilor sunt: ABS **Urtal A12** fabricat de firma italiană *Montedison (Montepolimeri & Vedril)*, SAN **Sanrex SAN-C** comercializat de cei de la *Techno Polymeri*, PA6 **Kelon B H CET/30** realizat de firma italiană *Lati Industria Termoplastici SPA*, PSU **Styrolend PC 2065** fabricat de cei de la *BASF*, LLDPE **Flexirene MR50** comercializat de *Polimeri Europe* și SBC **Styrolux 3G 33** realizat de firma *BASF*.

În urma realizării simulărilor privind curgerea topituri acestor materiale în scopul umplerii acestui model referențial este realizat tabelul 6.9 cu o serie de rezultate obținute. Se constată din consultarea rezultatelor că cel mai rapid timp de umplere îl prezintă materialul LLDPE urmat de PSU. Dintre cele șase materiale utilizate, materialul care realizează umplerea reperului în timpul cel mai îndelungat este PA6. Viteza de forfecare maximă cu valoarea cea mai ridicată nu este a materialului LLDPE aceasta fiind atribuită polisulfonei. Materialul cu cea mai mică viteză de forfecare este PA6, fiind nereproductiv pentru acest tip de reper.

Tabelul 6.9

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
ABS	0,4128	1092,5	240,4	20,41	246,8
SAN	0,5103	911,1	220,2	20,51	225,9
PA6	1,324	321	255	21,31	257,7
PSU	0,4096	1098,3	250,1	20,41	256,5
LLDPE	0,4069	1016,5	190,1	20,40	193,1
SBC	0,5114	903,3	230,1	20,51	236,9

În figura 6.18 se prezintă diverse ipostaze ale modelului referențial pentru industria vestimentară-toc de pantof. Figura este reprezentativă pentru un timp de umplere de 0,4 secunde și se observă comparația cu piesa realizată în timpul de 1.3sec. De asemenea se prezintă viteza de deformare maximă pentru materialul PA6 la un ciclu de injectare de 21,31sec. Temperatura frontului de curgere reprezintă un alt parametru evidențiat în cazul simulării acestui reper și este specific materialului cu vâscozitate scăzută PSU. Temperatura frontului de curgere variază în acest caz în intervalul 245-250 $^{\circ}C$ , cea mai mare valoare fiind înregistrată în apropierea punctului de injectare iar cea mai mică la cea mai mare depărtare de punctul de injectare ales.

Presiunea în punctul de injectare reprezintă o altă imagine reprezentativă a figurii 6.18 în care se prezintă faptul că presiunea atinge valoarea de 2,8MPa în primele două secunde de injectare după care scade la 2,3MPa și se menține constantă până ajunge la 11sec după care tinde spre zero. Ultima imagine reprezentativă pentru acest exemplu este variația forței de închidere în funcție de timpul de injectare.

Aceste exemple de simulare de curgere au fost realizate în scop de cercetare privind modul de umplere al cavităților realizate și tipurile de materiale utilizate. Așa cum se poate constata în urma rezultatelor obținute cele mai eficiente materiale privind umplerea reperelor și timpul de injectare îl reprezintă materialele cu vâscozitate ridicată. De cealaltă parte a baricadei privind timpul de umplere al reperelor se găsesc materialele cu vâscozitate scăzută. Pe viitor se urmărește realizarea mai multor repere respectiv experimente de simulare cu mai multe materiale ce prezintă vâscozitate diferită.

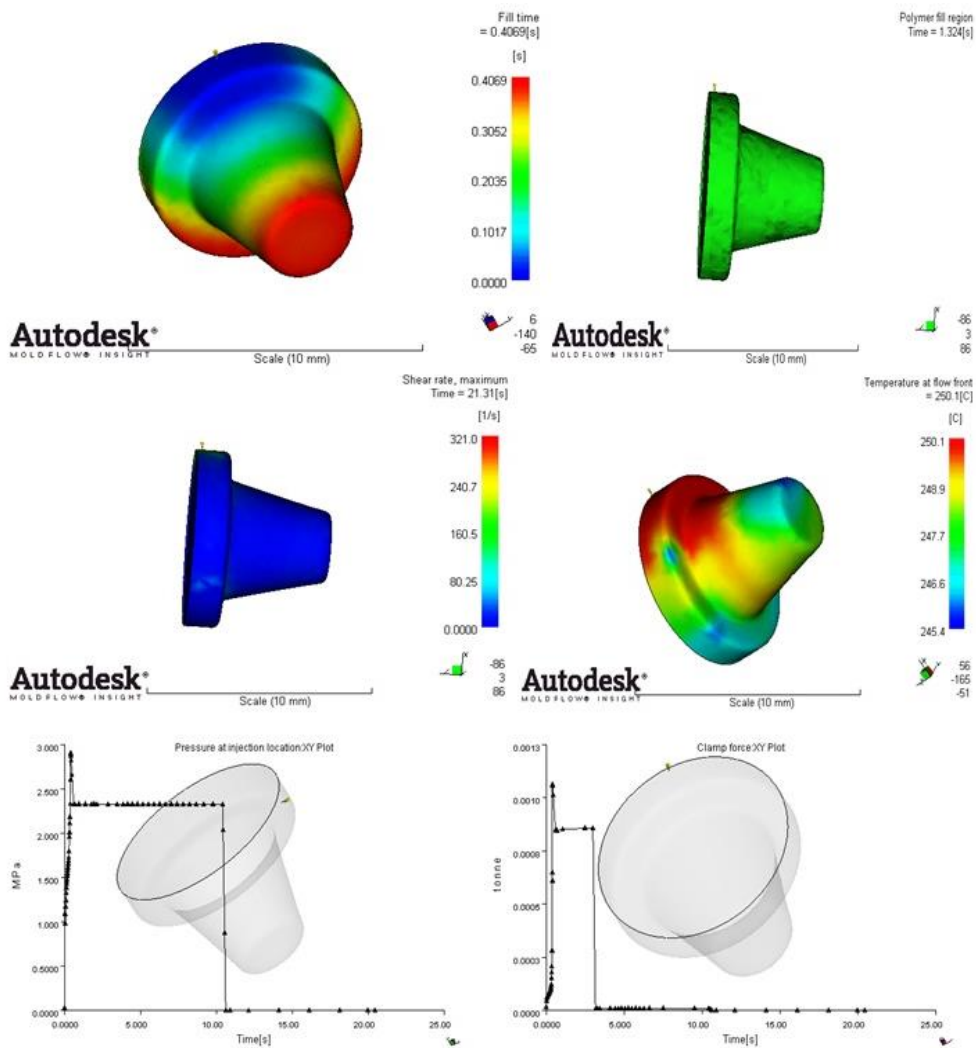


Fig. 6.18. Rezultate privind umplerea reperului toc

Pe lângă piesele prezentate din industria vestimentației vom aborda o serie de modele privind industria auto. Un exemplu în acest sens îl reprezintă primul tip de buton reprezentat în figura 6.19. Pentru acest reper au fost utilizate șase tipuri de materiale: **LCP Vectra B230** realizat de firma *Ticona*, HDPE **Eraclene MR80**



fabricat de cei de la *Polimeri Europa*, LDPE **Lupolen 1800 H** comercializat de firma *Basell Polyolefins Europe*, PP **Astryn EPF 30 U** realizat de cei de la *Montell Europe*, PBT **Later 4 G/30** fabricat de italienii de la *Lati Industria Termoplastici SPA* respectiv ABS **Terblend N NM-11** comercializat de firma *BASF*. Figura prezintă piesa de tip buton într-o primă ipostază de solidificare unde timpul de răcire al piesei este de 20sec. Tot această figură ilustrează contracția volumetrică a reperului pentru un timp de aproape 3sec în care contracția oscilează între 6-22%.

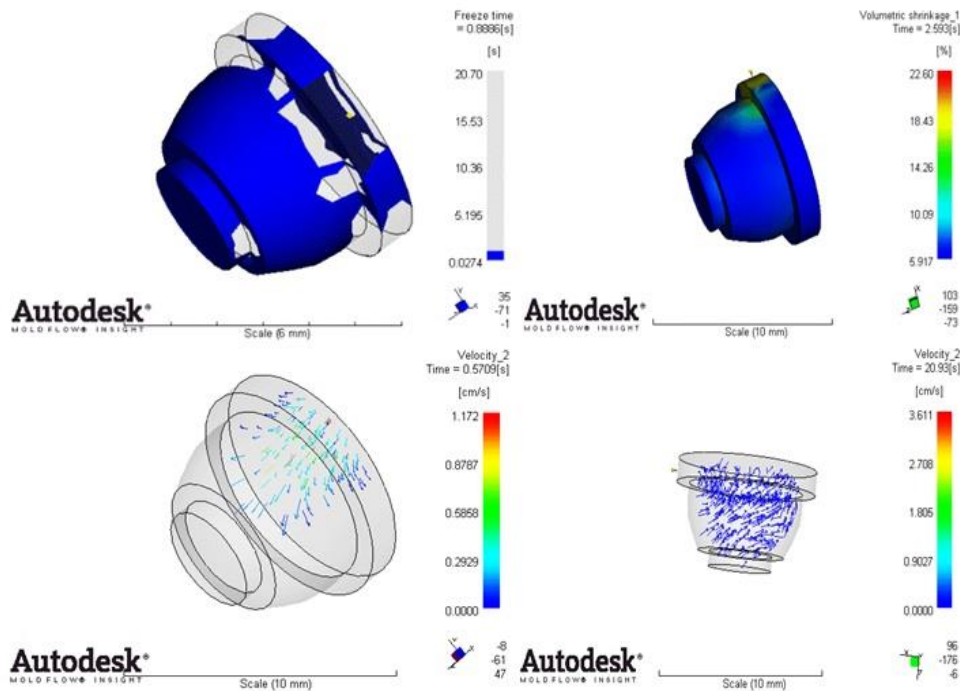


Fig. 6.19. Modelul referențial de tip buton

Modul în care este distribuită viteza materialului polimeric în cavități se prezintă în două ipostaze și se observă că viteza este mai mică în apropierea pereților piesei și mai ridicată înspre centrul piesei. Cu materialele prezentate anterior se întocmește tabelul 6.10 care prezintă rezultatele obținute în urma simulărilor realizate pentru piesa de tip buton.

Tabel 6.10

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
LCP	2,73	73,81	295	22,70	295,7
HDPE	0,4136	488,8	240	20,41	241,2
LdPE	0,5142	403,8	225,1	20,51	227,3
PP	0,9419	222,1	240	20,93	241,7
PBT	1,552	133,4	250	21,54	251
ABS	0,7249	288,1	260,1	20,72	262,6

Din tabel se observă faptul că materialul care prezintă cea mai bună fluiditate este HDPE a celor de la Polimeri Europa. Totodată cea mai nedorită reprezentare privind timpul de umplere o prezintă LCP-ul care prezintă și cea mai mică viteză de forfecare.

Următorul model referențial din industria auto îl reprezintă un alt tip de buton care este realizat cu pereți subțiri. Pentru acest tip de buton sunt realizate simulări de curgere din următoarele materiale: **ABS Terluran HH-112** realizat de *BASF*, **PA6 Techno ASA AX23** comercializat de *Techno Polymer*, **PET Rynite 555 NC010** de la cei de la *Du Pont Europe*, **PP Adstif HA740N** fabricat de *Basell Polyolefins Europe*, **PS Edistir FA20100** realizat de italienii de la *Montedison (Montepolimeri & Vedril)* și **TPC-ET Hytrel 3078** comercializat de *Du Pont Europe*.

Cea mai bună soluție pentru acest tip de buton îl reprezintă PA6 și ABS care au aproape același timp de injectare dar și ciclul de injectare. Una dintre diferențe între cele două materiale o reprezintă viteza de forfecare maximă care în cazul ABS-ului este mai ridicată cu aproape 200 de unități. Nu se poate afirma că acest tip de reper pentru care s-au realizat simulările de curgere respective ar avea un material "problemă" la umplere deoarece toți timpii de umplere sunt sub 0,5sec iar viteza de forfecare maximă depășește pragul de  $1000s^{-1}$ .

Tabel 6.11

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
ABS	0,2054	2575,8	250,3	20,20	253,6
PA6	0,2055	2409	230,1	20,20	233
PET	0,3029	1266,6	285,1	20,3	287,2
PP	0,3103	1481,3	240,1	20,31	242,4
PS	0,4105	1073,9	200,1	20,41	203,3
TPC-ET	0,3067	1307,1	210,1	20,3	213,3

Figura 6.20 prezintă modelul referențial de tip buton cu pereți subțiri. Din figură se evidențiază o umplere a reperului într-un timp de 0,2sec cu un singur punct de injectare situat în lateralul piesei. Aceeaș figură prezintă viteza de curgere a polimerului în cavitate ce este evident mai mare în zona apropiată punctului de injectare după care aceasta începe să se diminueze. Viteza de forfecare maximă se situează în acest caz în apropierea punctului de injectare și valoarea acesteia este de  $1481s^{-1}$ . În urma realizării simulărilor de curgere a reperului de tip buton cu pereți subțiri se constată că materialele care au dat cele mai bune rezultate sunt materiale cu o vâscozitate scăzută sau medie.

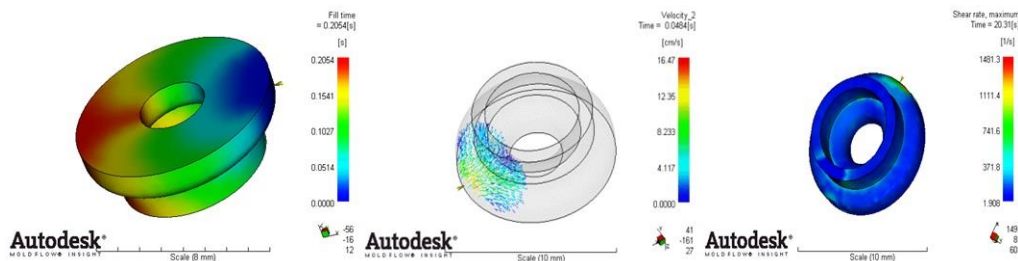


Fig. 6.20 Simulare pentru buton cu pereți subțiri

Un alt model referențial destinat industriei auto îl reprezintă un cap de redare pentru casetofon. Pentru realizarea simulărilor acestui reper din industria auto au fost utilizate trei materiale. Astfel din baza de date a programului Autodesk Moldflow au fost selectate: **ABS-Terlux 2802 TR** fabricat de *BASF* și **Techno ABS 110** realizat de *Techno Polymer*, **PA6,6 Zytel 101NC010** comercializat de *Du Pont*, **PA6 Latamid 6 H2 G/20 V2 HF** fabricat de italienii de la *Lati Industria Termoplastici SPA*, **PP-Hostacom BB 73F** fabricat de cei de la firma *Basell Polyolefines Europe* și **Hifax BA 238G** comercializat de *Montell Europe*.

Dintre cele trei materiale alese cea mai bună soluție în simulări a fost ABS urmată de PP. Acest fapt este evident din tabelul 6.12. Ciclul de injectare cel mai scurt este realizat de materialul Techno ABS 110 de la firma Techno Polymer.

Tabelul 6.12

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
ABS1	0,4120	5616,6	245,4	20,41	247
ABS2	0,0815	28817	221,3	20,08	223,9
PA6.6	0,709	3361,2	290,1	20,7	291,1
PA6	10,74	203,2	240	30,62	241,3
PP1	0,5136	4387,9	240,1	20,51	241,1
PP2	0,5188	4454,6	235,1	20,51	236,3

Figura 6.21 este reprezentativă pentru o serie de încercări referitoare la umplerea cavității matriței cu topitură de material respectiv distribuția vitezei frontului de curgere în modelul referențial ales.

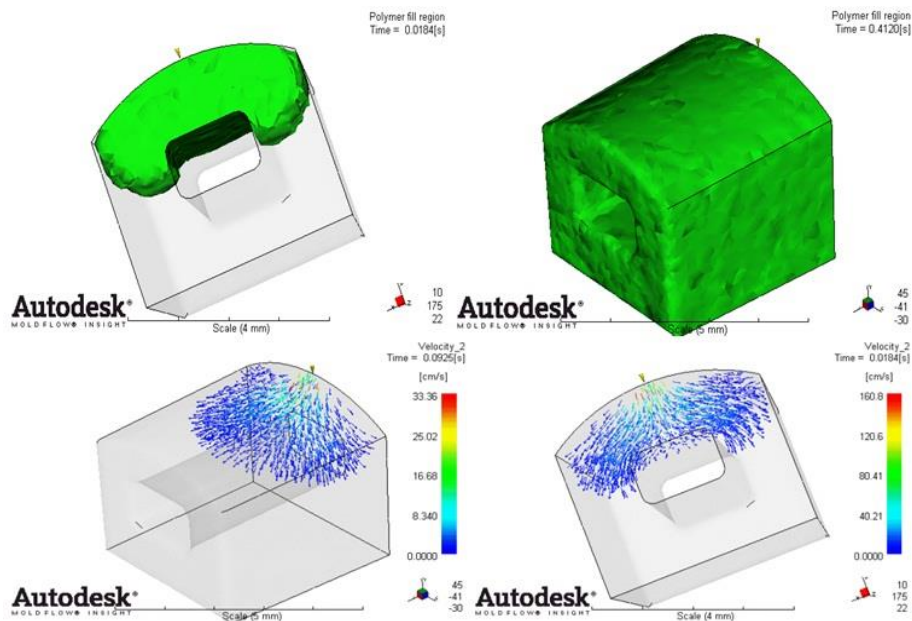


Fig. 6.21. Umplere reper cap redare

Ultimul model referențial din industria auto îl reprezintă un locaș special pentru fixarea unui buton de formă dreptunghiulară ce prezintă două puncte de injectare laterale care au dezavantajul formării unor linii de sudură la întâlnirea fronturilor de curgere ceea ce oferă o rezistență mică la solicitări. În figura 6.22 sunt evidențiate o serie de rezultate în urma simulărilor realizate pe acest reper. Astfel se pot observa o serie de goluri de aer la nivelul liniei de sudură formate la injectare și un timp de umplere de 0.3sec. Temperatura topiturii este evidentă în cazul umplerii unui reper în 20,4sec. Viteza topiturii de material utilizat se evidențiază prin săgeți și un maxim al acesteia este de 25,5 cm/sec. Orientarea fibrelor materialului polimeric reprezintă un alt rezultat evidențiat în figură și se constată că acestea ating valoarea maximă înainte ca cele două fronturi de curgere să se întâlnească iar valoarea minimă chiar la întâlnirea fronturilor de curgere. Ultima imagine a figurii prezentate reprezintă valoarea maximă a vâscozității de material pentru un ciclu de injectare de 21,33 de secunde.

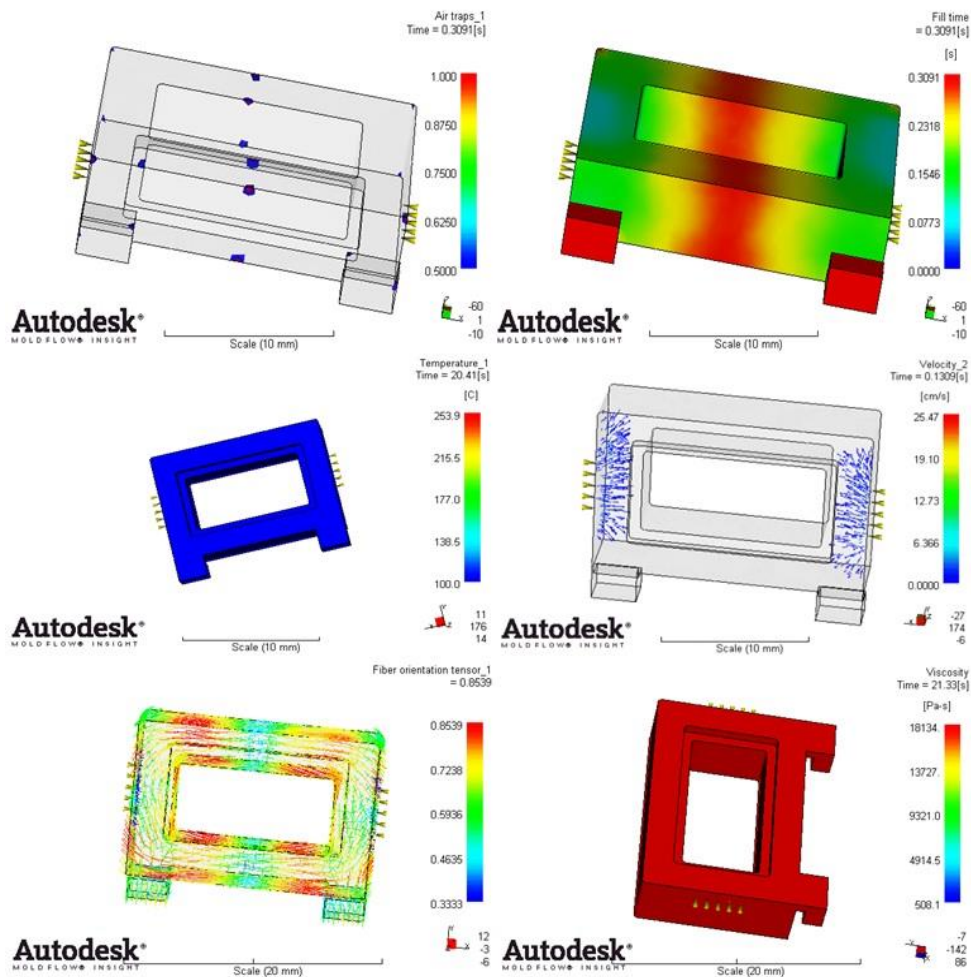


Fig. 6.22 Model referențial de tip locaș pentru buton

Materialele utilizate la realizarea simulărilor de curgere pentru acest tip de reper sunt următoarele: **ABS E7301** fabricat de *Techno Polymer*, **PBT Crastin 6129 NC010** realizat de firma *Du Pont Europe*, **PMMA Vedril 7** comercializat de firma italiană *Montedison (Montepolimeri & Vedril)*, **LLDPE Riblene MR10** fabricat de *Polimeri Europa*, **HDPE Purell GD 6250** realizat de cei de la *Basell Polyolefins Europe* și **LCP Zenite 5130L BK010** de la firma *Du Pont Europe*. Tabelul 6.13 prezintă rezultatele obținute în urma simulărilor de curgere pentru aceste materiale utilizate și se constată că cel mai bun timp de umplere a reperului îl oferă PMMA respectiv LLDPE. Soluția nedorită pentru acest tip de piesă îl constituie PBT-ul a cărui timp de injectare este de cca. 1.5sec.

Tabel 6.13

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
ABS	0,4154	4687	250,4	20,41	253,9
PBT	1,336	1424,3	250	21,33	252
PMMA	0,3091	7611,9	240,3	20,31	243,1
LLDPE	0,3087	7854,4	190,1	20,31	191,5
HDPE	0,6324	3564,8	240,1	20,63	242,6
LCP	0,81	2714	335	20,8	336,1

În urma realizării simulărilor de curgere pentru materiale specifice industriei auto se realizează o serie de simulări pentru modele referențiale ale industriei IT. Astfel pentru un fixator de diodă reprezentat în figura 6.23 se utilizează din baza de date a programului Moldflow următoarele materiale: **SAN Luran 358 N** realizat de cei de la firma *BASF*, **HIPS Polystyrol 2710** comercializat de *BASF*, **PC/ABS Excelloroy CK12** fabricat de *Techno Polimer*, **POM Delrin 100NC010** de la *Du Pont Europe*, **PP Moplen EP340M** comercializat de firma *Basell Polyolefins Europe* și **LCP Vectra S475** realizat de cei de la *Polyplastics*.

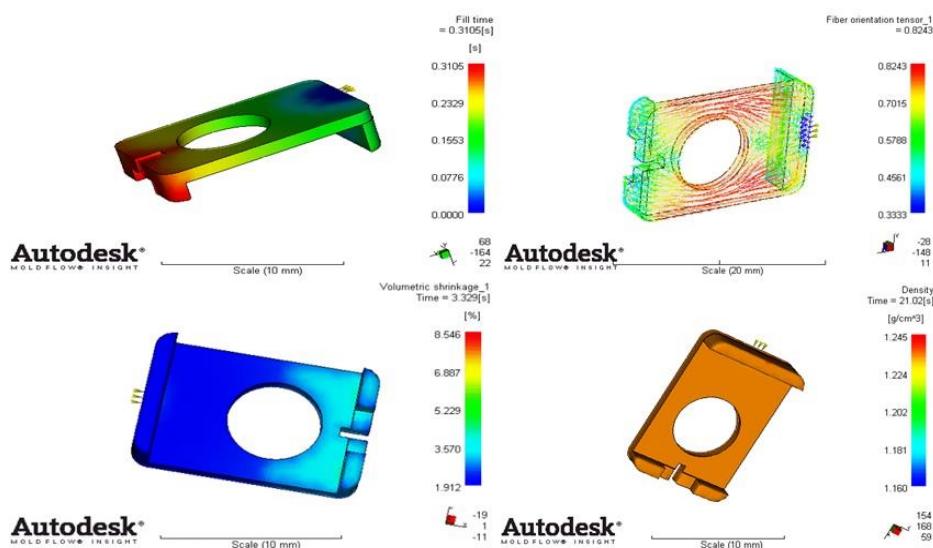


Fig. 6.23. Fixator diodă

Pentru acest reper ce prezintă o greutate de 0.11grame și o grosime de perete maximă de 1mm se constată din Tabelul 6.14 în urma simulărilor de curgere realizate că materialul optim îl reprezintă de fapt, nu unul ci patru materiale dintre cele alese SAN, HIPS, PC/ABS și PP.

Tabelul 6.14

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
SAN	0,3104	1607,6	230,1	20,31	235,2
HIPS	0,3105	1359,7	220,1	20,31	225,2
PC/ABS	0,3129	1096,5	260,1	20,31	266,6
POM	1,029	403,9	215,1	21,02	219,6
PP	0,3128	1196,1	240	20,31	243
LCP	0,5052	628,7	360	20,5	361,3

Materialul care prezintă cel mai slab timp de umplere al matriței și are, de asemenea cea mai mică viteză de forfecare maximă este considerat POM.

Un alt model referențial privind industria IT îl reprezintă un element elastic utilizat pe plăcile de circuit integrat sub forma literei V. Rezultatele obținute în urma simulărilor realizate pentru acest reper sunt evidențiate în tabelul 6.15. Pentru realizarea simulărilor de curgere în mediul MoldFlow au fost extrase din baza de date a softului următoarele cinci materiale: PA6 **Techno ASA AX23** realizat de firma *Techno Polymer*, PMMA **Vespel CF30 NC** de la firma *Du Pont Europe*, TPO **Hifax CA53A** comercializat de *Basell Polyolefins Europe*, PSU Ultrason S **2010** fabricat de *BASF* și SBS **Styrolux 3G 33** realizat tot de firma *BASF*.

Tabelul 6.15

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
PA6	0,1053	6045,2	230,1	20,1	234,2
PMMA	0,1061	3996,5	420,3	20,1	425,6
TPO	0,1051	3704,8	205,1	20,1	208,4
PSU	0,2166	1624,5	350,1	20,21	360,9
SBC	0,1045	3808,7	230,1	20,1	233,8

La acest model referențial se poate observa faptul că, timpul ciclului de injectare al piesei este foarte apropiat în toate cele cinci cazuri iar timpul de injectare este, de asemenea apropiat ca valoare. Din tabel putem trage concluzia că pentru acest reper nu există un material mai bun sau mai puțin bun la injectare, toate materialele alese fiind considerate optime. Singurul material care se diferențiază de celelalte este considerat a fi PA6 deoarece prezintă o viteză de forfecare maximă superioară celorlalte materiale utilizate, chiar dublă uneori.

Figura 6.24 prezintă timpul de umplere al piesei elastice din industria IT pentru care a fost utilizat un material cu o vâscozitate scăzută. De asemenea au fost utilizate pentru acest reper și materiale cu o vâscozitate ridicată dintre care amintim PMMA-ul. O imagine a figurii sugerează orientarea pe care o au fibrele materialului polimeric ce se injectază în matriță. În acest caz datorită unei alegeri corespunzătoare a punctului de injectare se constată că orientarea cea mai slab



întâlnită este situată în apropierea punctului de injectare și în extremitățile sferice ale piesei iar orientarea cea mai vizibilă se găsește în acele piciorușe ale piesei. Un alt parametru prezentat în figura 6.24 îl constituie viteza maximă de deformare care are o valoare aproximativă de  $1625\text{s}^{-1}$  pentru un ciclu de injectare de cca. 20 de secunde. De asemenea figura mai prezintă și distribuția presiunii în piesă care este mai mare în apropierea punctului de injectare și mai mică înspre extremitățile modelului realizat.

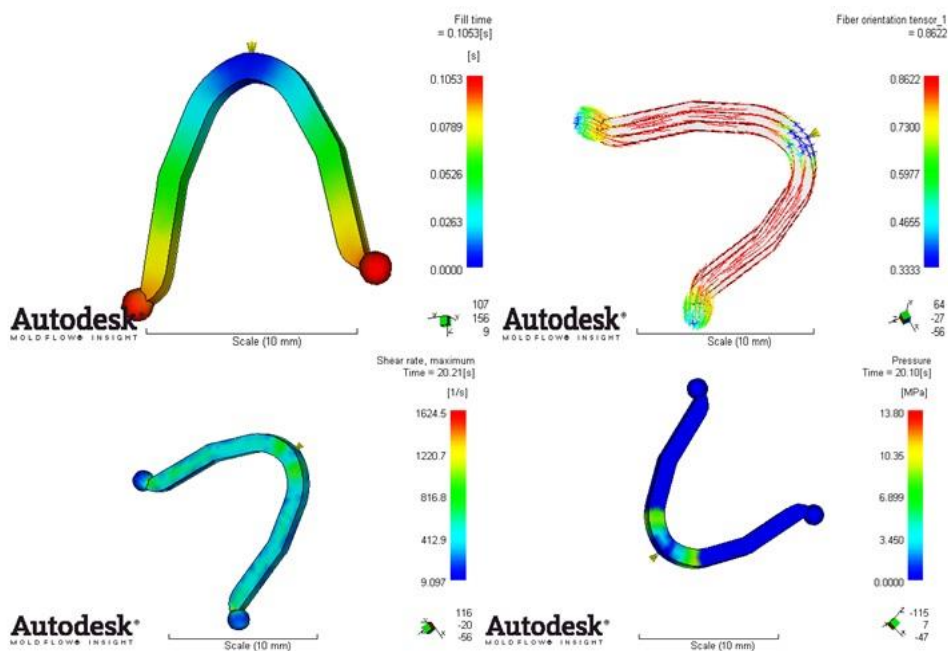


Fig. 6.24. Element elastic din industria IT

Tot pentru industria IT au fost realizate simulări de curgere specifice umplerii unei plăci pentru cip din materiale polimerice. În acest sens sunt utilizate o serie de patru materiale termoplastice din baza de date a programului Autodesk MoldFlow. Materialele utilizate pentru acest tip de model referențial sunt: PA6 **Latamid 6 H2 G/20 V2 HR** realizat de firma italiană *Lati Industria Termoplastici SPA*, PS **Styoblend PC 2065** comercializat de cei de la *BASF*, LDPE **Lupolen 1800 H** fabricat de *Basell Polyolefins Europe* și HDPE **Eraclene MR 80** comercializat de *Polimeri Europa*.

În tabelul 6.16 sunt prezentate rezultatele obținute în urma simulărilor de curgere pentru acest tip de model utilizând cele patru materiale amintite anterior. Astfel putem determina faptul că un singur material prezintă un timp foarte îndelungat de curgere fiind neproductiv în comparație cu celelalte trei materiale utilizate, timpul acestui material fiind de aproximativ zece ori mai mare decât al celorlalte. Materialul care intră în discuție ca fiind neproductiv din punct de vedere al curgerii este PA6 care prezintă un timp de injectare de 3,4sec și un ciclu total de injectare de 23,3sec. Următoarele trei materiale utilizate în realizarea simulărilor prezintă un timp de umplere a cavității dorite de 0,2sec și nu există o diferență majoră între timpii de umplere a acestora. Acelaș lucru se poate afirma și în cazul timpului ciclurilor de injectare. Dacă ar fi să facem o delimitare a celor trei materiale



utilizate considerate productive sau optime suntem nevoiți să alegem polistirenul în detrimentul celor două tipuri de polietilenă existente. Acest fapt se realizează în funcție de viteza de forfecare maximă și nu în funcție de timpul de injectare, temperatură sau ciclul de injectare al piesei respective.

Tabelul 6.16

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
PA6	3,4	161,6	240,1	23,36	241,4
PS	0,2063	1658,5	250	20,2	253,1
LDPE	0,2064	1547,3	225,1	20,2	228,1
HDPE	0,2066	1401,4	240	20,2	243,1

Figura 6.25 prezintă o serie de simulări privind acest reper dintre care putem observa un timp de umplere, o viteză de forfecare maximă, un timp de solidificare și modul de orientare al fibrelor de material polimeric la curgere. Se observă faptul că pentru această piesă au fost utilizate mai multe puncte de injectare ceea ce denotă faptul că pentru realizarea acestei injectări se utilizează un dig de formă peliculară sau chiar evantai. Figura prezintă faptul că la un ciclu de injectare de 20,2sec viteza de forfecare maximă are valoarea de  $1401s^{-1}$ . De asemenea se prezintă un timp de umplere al modelului care este de 0,2sec și un timp de solidificare al modelului care se realizează în 7,2sec. Orientarea fibrelor materialului polimeric prezintă cea mai mare valoare în planul longitudinal al plăcii.

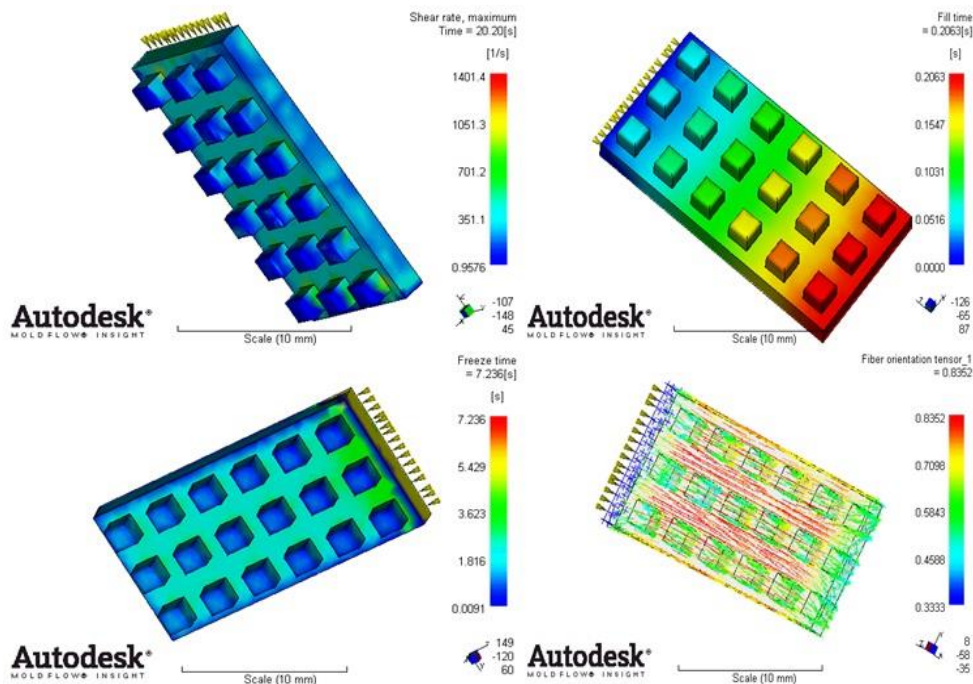


Fig. 6.25. Placă de tip cip din industria IT

Alte trei modele referențiale din industria IT sunt: o piesă cu pereți subțiri, o placă destinată utilizării în industria electronică și o mufă de calculator. Diverse simulări și tabelul specific cu materialele utilizate pentru aceste trei modele sunt prezentate în ANEXA 6.4.

Pentru piesa cu pereți subțiri în simulările de curgere sunt utilizate următoarele cinci materiale din baza de date a softului Autodesk MoldFlow: SAN **Sanrex SAN-C** realizat de firma *Techno Polymer*, POM **Ultraform H4320** comercializat de firma *BASF*, PP **Molpen 2000 HEXP** realizat de cei de la *Basell Polyolefins Europe*, LCP **Vectra B230** fabricat de firma *Ticona* respectiv PCT **Thermix CG 907** comercializat de firma *Du Pont Engineering Polymers*. Dintre aceste cinci materiale se constată că cel mai bun material considerat din punct de vedere al timpului de umplere al reperului îl reprezintă PCT-Thermix CG 907. Contrar cu acest material se situează POM care este considerat a fi cel mai nefavorabil ca timp de injectare pentru acest tip de model.

Pentru modelul referențial de tip placă destinat industriei electronice sunt utilizate șase materiale termoplastice din baza de date a soft-ului utilizate la realizarea simulărilor de curgere. Materiale alese sunt: HDPE **Purell GD 6250** comercializat de *Basell Polyolefins Europe*, LLDPE **Flexirene MR50** fabricat de firma *Polimeri Europa*, PS **Edistir FA20100** realizat de italienii de la *Montedison (Montepolimeri & Vedril)*, POM **Delrin 100NC010** de la *Du Pont Europe*, PA6 **Kelon B H CET/30** comercializat de firma italiană *Lati Industria Termoplastici SPA* și PE **Keyflex BT 1163D BK** fabricat de *Du Pont Europe*. Dintre materialele utilizate cel mai eficient material privind timpul de injectare al reperului îl reprezintă LLDPE cu 0,1sec. De asemenea pentru acest model referențial materialul cel mai puțin favorabil pentru realizarea umplerii este POM.

În cazul modelului referențial de tip mufă utilizată în industria electronică se utilizează un singur tip de ABS din baza de date a programului Autodesk MoldFlow care este **Terblend N NM-11** fabricat de firma *BASF*. Pentru acest material în simulările de curgere realizate au fost modificate doar temperaturile matriței. În Anexa 6.4 se poate observa faptul că au fost realizate simulări de curgere pentru o matriță cu mai multe cuiburi. Prin urmare au fost realizate simulări de curgere pentru două, patru sau 16 cuiburi. La injectarea a două cuiburi se constată un timp de umplere de 5,2sec și un ciclu de injectare de 25sec. În cazul injectării a patru piese simultan se constată o umplere a reperelor în 9,2sec și un ciclu de injectare de 29sec. Pentru injectarea a 16 repere simultan timpul de umplere este de 11,2sec iar ciclul de injectare în acest caz atinge valoarea de  $\approx 31$ sec.

Pe lângă modelele prezentate anterior au mai fost realizate modele specifice industriei mecanice. Astfel un prim model în acest sens îl reprezintă o piesă de tip carcasă pentru reductor a cărei greutate este de 0.76 grame. Pentru acest model referențial au fost selectate trei materiale polimerice destinate realizării unor simulări de curgere. Aceste materiale sunt: ABS **Terluran HH-112** de la firma *BASF*, TPO **Hifax CA53A** fabricat de *Basell Polyolefins Europe* și POM **Ultraform H4320** comercializat de cei de la *BASF*. Pentru acest model au fost realizate încercări de curgere în cazul unui singur cuib sau pentru patru cuiburi pentru fiecare dintre cele trei materiale amintite anterior. O serie de rezultate în acest sens sunt prezentate în figura 6.26 iar tabelul 6.17 prezintă timpii de injectare și temperaturile specifice procesului. Conform rezultatelor prezentate în tabel se poate observa faptul că materialul optim pentru injectare în acest caz îl reprezintă TPO-Hifax CA53A ce prezintă un timp de umplere al modelului de 0.41sec. Materialul cel mai nefavorabil în acest sens îl reprezintă POM a cărui timp de umplere are valoarea de 3.6sec. Pe

lângă aceste rezultate privind umplerea unui singur model de piesă sunt prezentate și cele caracteristice umplerii a patru repere simultan.

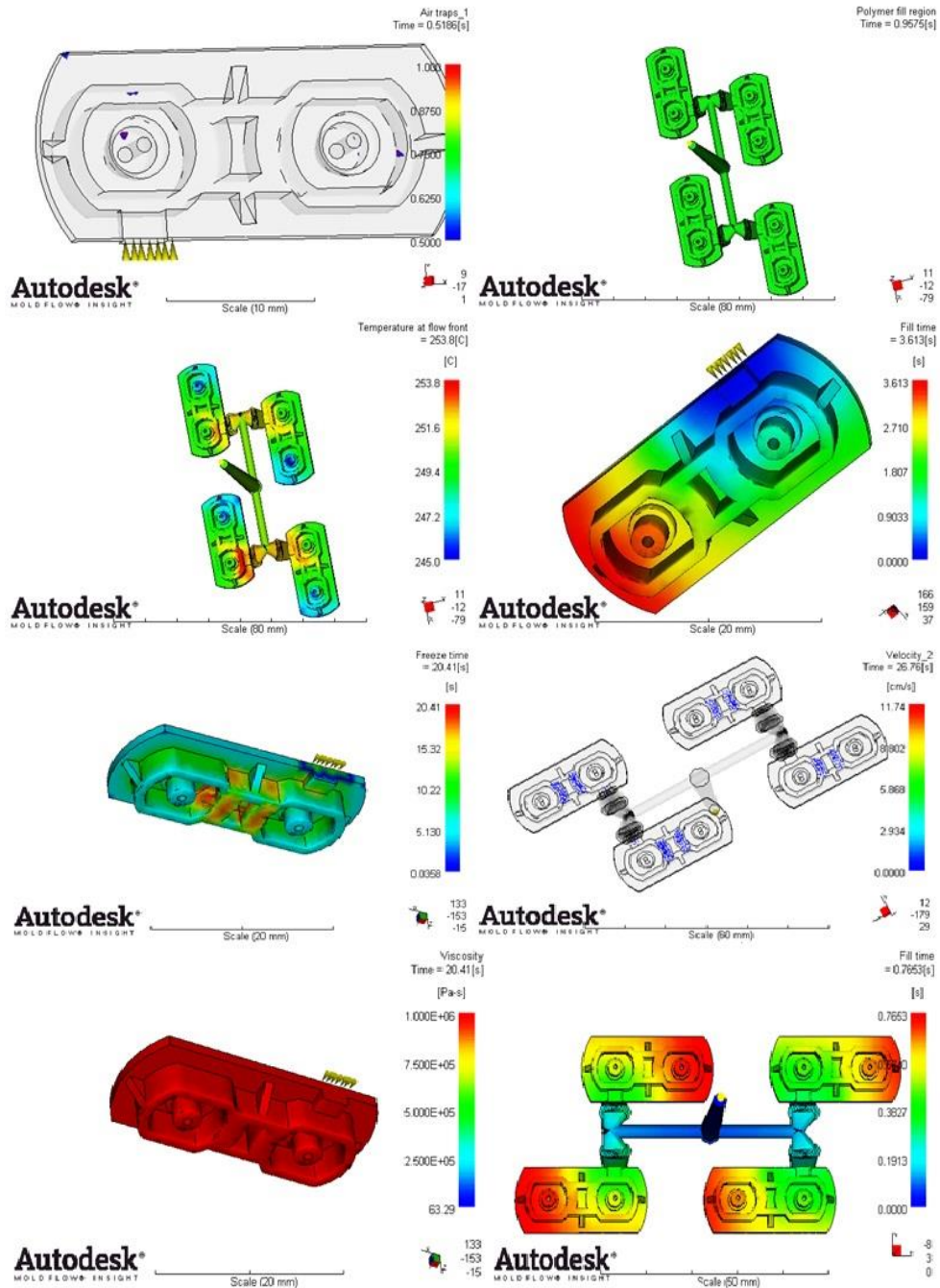


Fig. 6.26. Model de tip carcasă de reductor

Diferența de timp de umplere a modelelor este evidentă în cazul unei matrițe cu mai multe cavități și se constată că în cazul umplerii celor patru repere din TPO timpul de injectare atinge valoarea de 0.76sec în comparație cu timpul de umplere pentru materialul POM care are o valoare de aproape zece ori mai mare, timpul de injectare al în acest caz fiind de 6.86sec.

Tabelul 6.17

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
ABS	0,5186	2095,2	250,3	20,51	253
POM	3,613	241,9	200	23,57	201,2
TPO	0,4189	2287,7	205,2	20,41	206,1
TPO4cuib	0,7653	4405,2	206,8	20,75	217
POM4cuib	6,868	1255,5	202,3	26,76	205,7
ABS4cuib	0,9575	6520,8	253,8	20,95	286,1

Din figura 6.26 se pot evidenția o serie de rezultate din simulările de curgere realizate pentru acest model în cazul umplerii unei piese sau a unei familii de patru piese. Astfel în cazul injectării unui singur reper figura evidențiază golurile de aer din piesă, timpul de injectare, vâscozitatea de material și timpul de solidificare. Pentru injectarea a patru repere simultan figura este reprezentativă în a prezenta probabilitatea de umplere, timpul de umplere, modul de curgere al materialului polimeric respectiv temperatura frontului de curgere.

Un alt model referențial din industria mecanică îl reprezintă piesa de tip cutie din figura 6.27 care are o greutate de 0,24 grame. Pentru acest model de piesă au fost utilizate trei materiale polimerice din baza de date a programului: **SAN Luran 358 N** fabricat de *BASF*, **PA6,6 Latamid 66 H2 G/25** de la firma italiană *Lati Industria Termoplastici SPA* și **PBT Pibiter NRV20** comercializat tot de italieni, de această dată de la *Montedison (Montepolimeri & Vedril)*.

Au fost realizate diverse simulări de curgere pentru cele trei materiale utilizate iar în cazul materialului polimeric optim privind umplerea acestui model s-au făcut simulări privind umplerea mai multor cuiburi simultan.

Tabelul 6.18

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
SAN	0,4067	1055,8	230,2	20,4	231,7
PA6,6	7,908	48,03	273	27,79	273,3
PBT	1,922	191,1	240	21,9	240,4
SAN 2cuib	1,029	3704,3	231,1	21,01	233
SAN 4cuib	0,9769	3566	231,7	20,96	236
SAN 8cuib	0,8145	2979,1	232,2	20,8	240,8
SAN 16cuib	0,7622	5964	234	20,75	247,9

În tabelul 6.18 sunt prezentate rezultatele simulărilor de curgere realizate. Observăm că materialul optim pentru acest model îl reprezintă SAN ce prezintă un timp de injectare de 0.4sec. În contradicție cu acest material privind timpul de umplere se situează PA6,6 ce prezintă un timp de umplere de cca. 8sec și un ciclu de injectare de 27,8sec față de ciclul de injectare de 20sec al SAN-ului. Tabelul

prezintă, de asemenea și rezultatele obținute în cazul simulărilor de curgere pentru încercările pe mai multe cuiburi de unde se observă faptul că, cu cât numărul de cuiburi crește timpul de injectare al reperelor scade.

Figura 6.27 prezintă timpul de umplere în cazul materialului SAN și modul de orientare al fibrelor materialului polimeric la injectarea unui singur reper. În aceeaș figură sunt evidențiate modurile de amplasare a cuiburilor în matrice la simularea pentru două cuiburi, patru, opt sau chiar șaisprezece. De remarcat faptul că pentru simularea a două cuiburi este necesar un timp de umplere de 1sec ceea ce reprezintă aproape dublu față de injectarea unui singur reper. În cazul injectării a patru reperi se observă o scădere a timpului de injectare la 0.97sec iar pentru injectarea a opt reperi este necesar un timp de umplere de 0.81sec. La ultima încercare de simulare de curgere, aceea de umplere a șaisprezece cuiburi simultan se constată un timp de umplere de 0,76sec. Ciclul de injectare în cazul acestor încercări privind umplerea mai multor cuiburi este în jurul valorii de 20sec iar temperatura la care se realizează injectarea variază între 230-240°C.

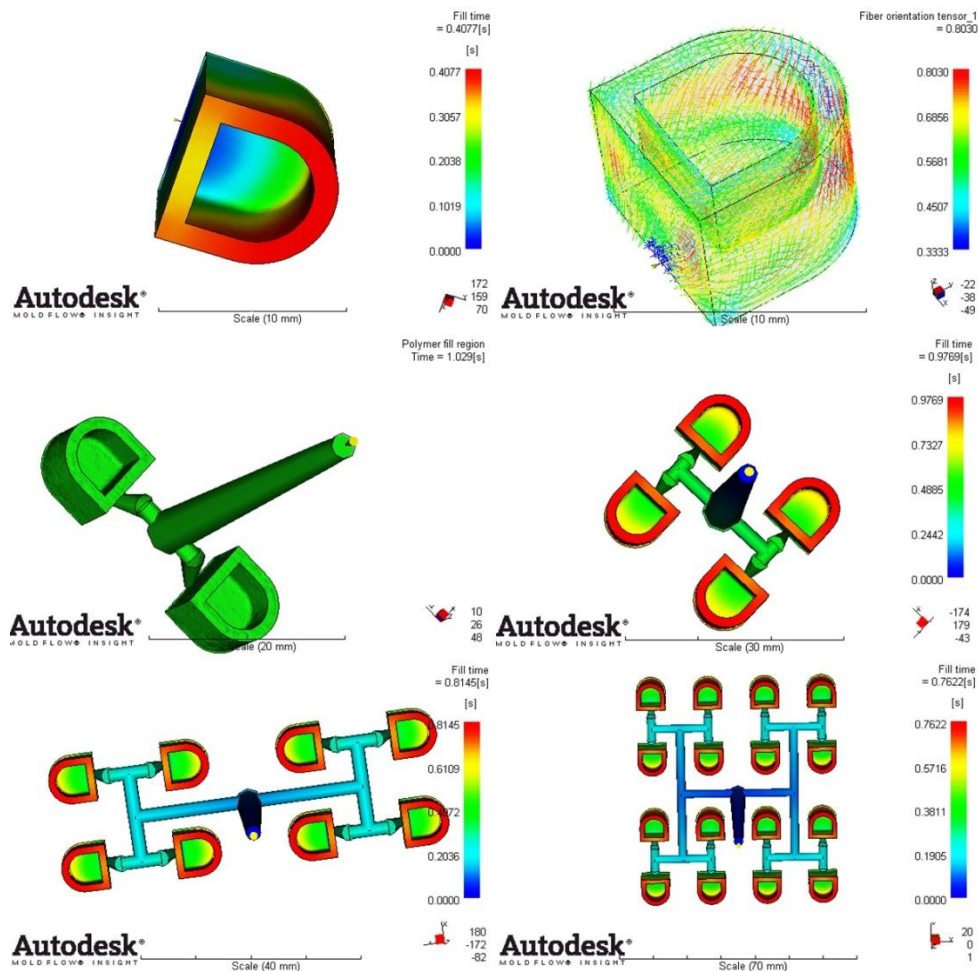


Fig.6.27. Model referențial de tip cutie



Un alt tip de model referențial din industria mecanică este elicea pentru turbină din fig. 6.28. Pentru acest tip de model în vederea realizării simulărilor de curgere și umplere a matriței au fost utilizate patru tipuri de ABS din baza de date a softului Autodesk MoldFlow. Aceste materiale sunt: ABS1 **Terblend N NM-11** comercializat de cei de la *BASF*, ABS2 **Urtal A12** de la firma italiană *Montedison (Montepolimeri & Vedril)*, ABS3 **E7301** fabricat de *Techno Polymer* și ABS4 **Techno MUH E7301** realizat de firma *Techno Polymer*. Rezultatele simulărilor sunt redată în tabelul 6.19 care prezintă timpii și temperaturile utilizate în procesul de injectare.

Tabelul 6.19

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
ABS1	0,9182	676,9	260	20,91	261,5
ABS2	0,4093	1466,5	240	20,4	242,7
ABS3	0,4104	1524,5	250,5	20,41	253,2
ABS4	0,4104	1524,5	250,5	20,41	253,2

Dintre cele patru tipuri de ABS ales se constată că materialul optim este Urtal A12 iar timpul de injectare al modelului cu acest material atinge valoarea de 0,4sec. De asemenea materialele E7301 respectiv Techno MUH E7301 reprezintă materiale care prezintă o bună comportare la curgere privind acest model. Figura 6.28 prezintă modelul de piesă în diverse ipostaze (timp de umplere, temperatură, presiune și viteza topiturii de material) privind rezultatele de simulare obținute.

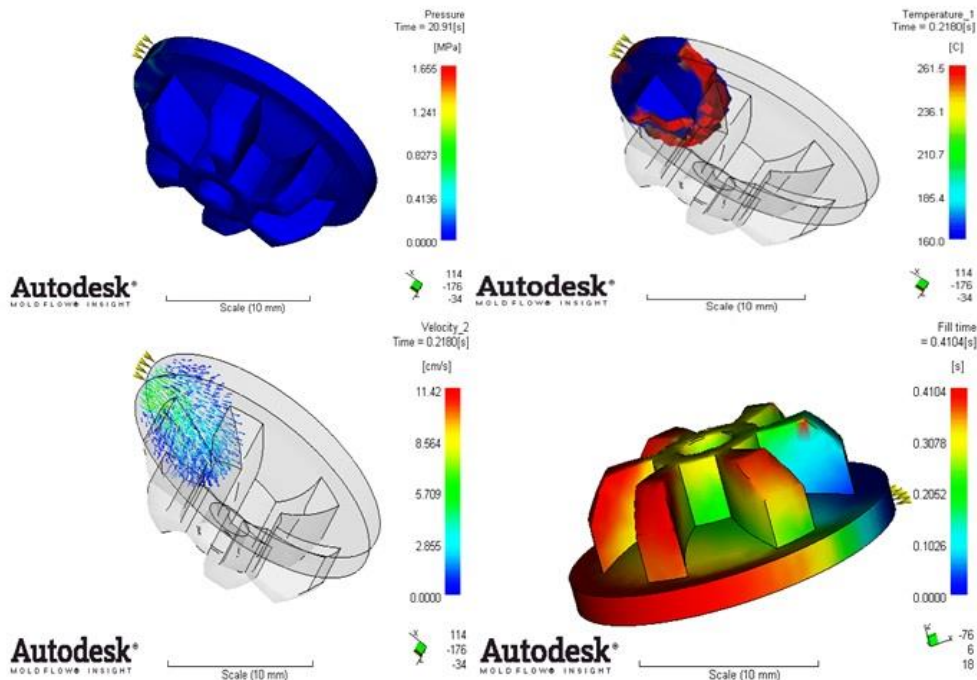


Fig. 6.28. Model de tip elice

Un ultim model referențial din industria mecanică pentru care au fost realizate simulări de umplere îl reprezintă o roțiță cu pereți subțiri a cărei greutate este de 0,05g și o grosime de perete de 0.8mm. Pentru această roțiță din industria mecanică au fost selectate patru materiale polimerice din baza de date a programului urmând ca pentru materialul cu cel mai bun timp de umplere să se realizeze și simulări de curgere pentru mai multe cuiburi. Materialele utilizate în acest sens sunt: **ABS 330** de la *Techno Polymer*, PA6,6 **Zytel 101 NC010** fabricat de firma *Du Pont Europe*, PMMA **Vedril 7** comercializat de italienii de la *Montedison (Montepolimeri & Vedril)* și POM **Ultraform H4320** de la *BASF*.

Rezultatele simulărilor sunt prezentate în tabelul 6.20 respectiv în figura 6.28. de unde se constată că materialul care se pretează cel mai bine pentru acest tip de model este ABS cu un timp de injectare de 0,2sec. Pe lângă ABS putem aminti ca și material optim pentru umplerea acestui reper PMMA-ul care prezintă o viteză de forfecare mai mare decât în cazul ABS-ului.

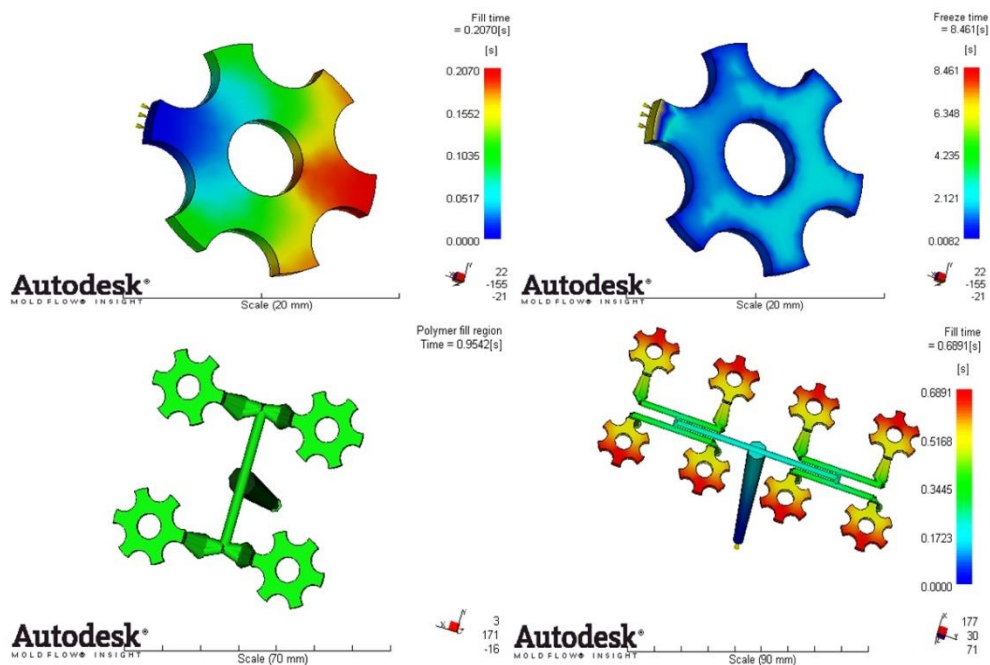


Fig. 6.29. Model referențial de tip roțiță

Tabelul 6.20

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [ $s^{-1}$ ]	Temperatura frontului de curgere [ $^{\circ}C$ ]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [ $^{\circ}C$ ]
ABS	0,207	1289	220,1	20,2	222,3
PA6,6	0,4073	647	290	20,4	290,5
PMMA	0,2075	1344,8	240,2	20,2	243,9
POM	1,975	188,6	200,1	21,95	201,6
ABS4cuib	0,9542	2466,4	221,5	20,94	226
ABS8cuib	0,6891	6942	223,9	20,68	238,7



Pe lângă simulările de curgere prezentate anterior, în ANEXA 6.5 se prezintă o serie de alte simulări de curgere realizate pentru matrițe cu mai multe cuiburi. În acest sens au fost realizate simulări de curgere cu diverse materiale pentru matrițe cu două, patru sau opt cuiburi. Studiul curgerii pentru mai multe repere din diverse domenii a fost realizat din motive de aplicabilitate în domeniul uzinal, din nevoia unei apropieri a rezultatelor obținute de realitatea cu care se confruntă în firme inginerii din domeniul matrișeriei în cazul producțiilor de serie sau masă pentru diverse repere realizate din materiale polimerice din perspectiva procedurii de microinjectare.

## 6.5. Concluzii

Analiza cu element finit reprezintă un domeniu de larg interes în zilele noastre pentru inginerii din diverse domenii deoarece softurile care lucrează astfel prezintă o serie de avantaje iar rezultatele obținute cu ajutorul acestora pot reduce considerabil timpul de lucru în cadrul unui proiect. [Long, 2009], [Donea, 2003]

Pentru această lucrare de doctorat analiza cu element finit a însemnat utilizarea unui program de simulare de curgere dintre cele mai cunoscute în acest domeniu (**Autodesk Moldflow**, Simpoe, Moldex3D, VisiFlow...), cu ajutorul căruia au fost realizate toate încercările de simulare de curgere pentru toate modelele referențiale alese.

Simulările realizate în scopul cercetării umplerii rețelelor de injectat cu secțiune circulară sub 3mm diametru, destinate procedurii de microinjectare au oferit rezultate pozitive privind umplerea acestora în proporție de peste 95%. De asemenea se constată că progresia aritmetică utilizată la realizarea tabelului de rețele minimale destinate procedurii de microinjectare este validă datorită proporționalității rezultatelor pozitive obținute.

Totodată încercările de simulare de curgere realizate pe diverse modele referențiale din diverse domenii specifice procesului de microinjectare tind să amplifice posibilitatea utilizării în producție a diverselor materiale polimerice cu vâscozitate diferită.

Concluzionând putem afirma în urma tuturor încercărilor de simulare de curgere realizate, că o serie de materiale au prezentat o bună comportare la curgerea prin microcavități în comparație cu alte materiale la care timpul de umplere al microcavităților a fost neproductiv sau în cazul în care umplerea microcavităților a fost incompletă.

## Cap. VII – Particularități în fabricația unei matrițe experimentale.

### 7.1 Scule și mașini-unelte utilizate

În industria construcțiilor de mașini pentru realizarea de matrițe precum și a componentelor acestora sunt utilizate mașini de frezat, de strunjit, de rectificat, de electroeroziune, etc. [Injection] Acestea pot fi clasice cu comandă manuală sau cu comandă numerică. Aceste mașini au nevoie de o diversitate mare de scule, specifice pentru realizarea diferitelor operații ce fac parte din procesul tehnologic al pieselor ce se doresc a fi obținute. [Cimatron], [Fanucge], [Cosma, 2011]

În cadrul acestei teze de doctorat se urmărește realizarea unor matrițe cu pastile amovibile destinate procedurii de microinjectare. Prin urmare mașinile și sculele utilizate în acest scop sunt de dimensiuni mai reduse decât cele convenționale și fac parte de regulă din ramura mecanicii fine. [Mikron]

Mașinile unelte utilizate în acest domeniu au aceleași caracteristici specifice cunoscute cu mașinile de prelucrat obișnuite cu diferența că principul de lucru este diferit. Astfel turația, viteza de așchiere precum și avansul sunt calculate și se aleg în mod diferit față de cele uzuale. [Micro-technica], [Proxxon, 2010]

Sculele în acest caz sunt realizate și obținute prin aceleași procedee ca și sculele convenționale cu diferența că la microprelucrări diametrul maxim al sculelor nu va depăși valoarea de 3-6 mm ele ajungând la un minim de până la 100 micrometri. [Guehring] Ca microscule utilizate la prelucrarea pastilelor pentru matrițe amintim electrozii destinați mașinilor de electroeroziune, diverse burghie, alezoare, tarozi și scule pentru gravat, lărgitoare, diferite tipuri de freze, unele dintre acestea fiind prezentate în capitolul trei al prezentei lucrări. În figura 7.1 pot fi observate câteva tipuri de astfel de scule care se găsesc în dotarea catedrei de TCM din Universitatea Politehnica din Timișoara cu ajutorul cărora se va realiza matrița și pastilele.

Dintre sculele cele mai frecvent utilizate în realizarea de elemente active amovibile destinate microinjectării amintim frezele ce pot fi de diverse configurații și/sau dimensiuni. În urma unei achiziții de scule, laboratorul de Prototipare Rapidă dispune de o serie de freze de diverse dimensiuni acestea variind de la 1mm la 8mm. În figura 7.1 se observă o serie de tipuri de freze diverse care au de la doi la patru dinți și chiar șase pentru finisare, iar duritatea la care acestea pot prelucra ajunge în unele cazuri la 65HRC. Diametrul de prindere al frezelor este cuprins de regulă în intervalul 1-8mm. Pe lângă această achiziție de scule, personal am achiziționat o serie de freze de dimensiuni mici utilizate în domeniul medicinei dentare în scopul realizării digurilor. Pentru aceste tipuri de freze achiziționate sunt recomandate de către producător regimurile de așchiere maxime la care pot fi solicitate sau exploatate. Majoritatea acestor freze sunt acoperite cu titan fapt ce le oferă o durată de viață mai lungă și o rezistență mai mare. Diversitatea aplicațiilor este mare acestea mergând de la prelucrări universale de piese până la realizarea de turbine. De asemenea, conform recomandărilor producătorului o parte din sculele achiziționate sunt specifice utilizării prelucrării cu viteze ridicate. [Cosma, 2008]

Materialele pe care aceste tipuri de scule le pot prelucra fără prea mari probleme sunt: aluminiul și neferoasele, oțeluri aliate, oțeluri carbon, oțeluri de scule, titanul, oțeluri durificate inoxul, iconel etc.



Fig.7.1. Tipuri de scule pentru microprelucrări existente în laborator

Lungimea frezelor existente este comparată cu un băț de chibrit și această comparație persistă și în cazul gravatoarelor existente în cadrul laboratorului precum și a celor patru biaxuri diamantate. Biaxurile sunt acoperite uniform cu praf de diamant și sunt utilizate la gravare în oțel, aliaj crom cobalt, sticlă, ceramică și porțelan. Turația maximă în cazul biaxului cu diametru de 1mm este de 300.000rot/min iar în cazul frezei diamantate de 1.8mm turația maximă este de 150.000 rot/min. Gravatoare există în dotarea laboratorului în număr de patru dintre care două sunt cu un diametru de 2mm, iar două cu un diametru de 3mm. Lungimea totală a acestor scule este de 110mm iar unghiul de atac sau de prelucrare al acestora este realizat la 60deg. Sculele pentru gravat sunt utilizate acolo unde frezele de dimensiuni mici nu mai pot da randament precum și acolo unde trebuie să apară pe piese nume de firmă, coduri, cifre sau alte inscripții. De

regulă aceste tipuri de scule sunt utilizate în industrie la gravarea unor date tehnice: coduri, nume etc. acolo unde poansonarea s-ar realiza mai greu.

Figura mai prezintă și o serie de sculele pentru rectificat sau lustruit. În primul caz acestea sunt biaxuri cu partea activă din corondum sau silicon carbid. Prin urmare aceste pietre de rectificat au o duritate constantă și o granulație fină și sunt utilizate la rectificarea sticlei, ceramicii, prelucrarea fontei a aliajelor dure din oțel precum și a aliajului tungsten carbid. Pentru aceste scule se recomandă utilizarea unei turații cu o valoare cuprinsă între 20.000 – 25.000 rot/min , turația maximă la care pot să prelucraze aceste scule fiind 100.000 rot/min. Accesoriile pentru lustruit sunt biaxurile și pasta pentru lustruit, redată în figură prezentate lângă gravatoare. Se observă faptul că acestea pot avea formă de disc, cilindrică sau conică. Materialul din care acestea sunt confecționate este pâsla iar turația maximă la care aceste scule pot lucra este de 15.000 rot/min, cea optimă recomandată fiind cuprinsă între 10.000 – 12.000 rot/min. [Proxxon, 2010]

Diametrul părții de prindere al sculelor prezentate poate fi de 3mm (până la 8mm la freze) sau de 2,3mm, sculele trebuind a fi fixate în pensete sau bucșe elastice în arborele principal al mașinii de frezat pentru o strângere cât mai eficientă și un joc minimal. [Rotar, 2008], [Rotar\_b, 2010]

Mașinile cu care se pot realiza pastile de dimensiuni mici sunt de regulă mașini de electroeroziune sau mașini de frezat. De asemenea se utilizează și mașini de strunjit de dimensiuni reduse precum și mașini de rectificat, de rodat sau lepuit. Pentru toate aceste mașini modul de lucru este aidoma celui clasic cu deosebirea că sculele sunt proiectate prelucrărilor cu viteze de aşchiere de cinci sau chiar zece ori mai mari decât vitezele cunoscute în cazul mașinilor-unelte de prelucrat convenționale. De exemplu, dacă la o mașina de frezat obișnuită turația maximă era undeva la 2500rot/min la mașinile actuale această turatie poate fi cuprinsă între 20.000...150.000 rot/min și poate ajunge la peste 200.000 rot/min.

La mașinile de frezat sau la strungurile de gabarit mic acționate cu comandă numerică se observă înlocuirea manivelelor prin motoare pas cu pas de dimensiuni mici destinate acționării meselelor sau traverselor port-sculă în scopul obținerii unor turații adecvate. Acestea sunt dotate cu un program de prelucrare în coordonate, program ce lucrează cu interfața convențională G-code sau ISO cunoscută de regulă în cazul CNC-urilor. Diferența între realizarea unor piese cu mașinile clasice sau cu comandă program constă în faptul că la acestea din urmă se reduc erorile semnificativ. Dacă se dorește să se realizeze o piesă cu o configurație simplă și o alta cu o configurație mai complexă se poate opta în primul caz la utilizarea unei mașini de prelucrat clasice dacă piesa nu prezintă suprafețe complicate iar în cazul următor se va opta pentru utilizarea unei mașini CNC. Pe mașinile clasice prelucrarea prin frezare după contur este greu sau chiar imposibil de realizat, fapt pentru care se preferă mașinile cu comandă numerică. Desigur că și sculele utilizate au evoluat ajungând la prelucrarea unor materiale cu duritate superioară așa cum sunt oțeluri cu duritate de 65HRC sau peste aceasta, iconel, inox, titanul ș.a.

Pentru realizarea modelelor fizice propuse în cadrul prezentei tezei de doctorat sunt prezentate mașinile unelte care constituie platforma operațională, sau baza experimentală pe care se pot realiza prelucrările necesare. Astfel o serie de prelucrări destinate realizării pastilelor sau altor componente ale matriței vor fi realizate pe FUS22 sau pe microfresa MF70 iar pentru realizarea componentelor complicate ale matriței precum și pentru realizarea cuiburilor complexe se utilizează mașina de frezat ISEL GFM 4433 pentru prelucrări în până în aluminiu, respectiv mașina de frezat cu viteze ridicate ISEL Premium 3020 destinată prelucrărilor de piese metalice.[Isel], [Rotar\_b, 2010], [Cosma, 2008], [Șerban, 2011]

Mașinile de frezat ISEL sunt destinate frezării, gravării sau măsurărilor la precizie ridicată precum și altor aplicații. Masa de prelucrat a mașinii de frezat ISEL Premium 3020 este realizată din granit iar greutatea acesteia este de aproximativ 350kg. Mașina este prevăzută cu un calculator încorporat la care se implementează programul frezării după care se face o simulare a acestuia în vederea corecțiilor de sculă. Gabaritul mașinii este de 1400x800x1700mm cursele de lucru fiind de 250x190x180mm având un cadru din oțel și o greutate totală de cca. 750kg. Turația este de 40 000rot/min și poate ajunge până la 80000rot/min dacă se utilizează o turbină de multiplicare a turației. Mașina de frezat ISEL GFM 4433 destinată prelucrării în aluminiu are o turație de 11000-25000rot/min, dimensiunile de gabarit (WxDxH) 780x1010x1740mm iar cursele de lucru (X,Y,Z) 330x430x160mm.

Cât privește microfresa MF70 aceasta este realizată de firma germană Proxxon și este destinată prelucrării prin frezare pe materiale ca fontă, oțel, bronz, aluminiu, plastic etc. Mașina are baza din fontă, prezintă un motor echilibrat și are o precizie de 0.05mm. Tensiunea de alimentare este de 220-240V iar puterea consumată este de 100W maxim. Viteza de rotație a sculei este cuprinsă între 5 000-20 000rpm iar greutatea mașini este de 7kg. Mașina are o masă de lucru de 200x70 mm cu axa X-Y având o cursă de lucru de 134mm respectiv 46mm și o cursă verticală de 80mm. Masa este realizată din aluminiu pe mașini CNC și are trei ghidaje în formă de T de 12x6x5mm. De asemenea mașina este prevăzută cu o mandrină specială în care se fixează pensete de oțel ce au ca scop o fixare mai bună a sculei. Pensetele sunt în număr de șase și pornesc de la diametrul de strângere de 1mm până la 3,2mm. Ca accesorii la această mașina se poate achiziționa o menghină destinată prinderii și fixării pieselor mici precum și un cap divizor.

Cele două mașini de frezat ISEL a căror caracteristici au fost prezentate anterior și minifresa MF70 de la firma Proxxon sunt evidențiate în figura 7.2.



Fig. 7.2. Mașini existente în laborator [Isel], [Proxxon, 2010]

## 7.2 Realizarea unei matrițe prototip din material polimeric.

Pentru realizarea unor încercări privind curgerea prin rețele și cavități la microinjectare trebuie să se realizeze o matriță specifică pentru acest procedeu, matriță care nu se încadrează în termenul de matriță standard referirea în cauză punând în evidență componentele standard ale matrițelor care se găsesc în pachetele tipizate achiziționate de la firme specializate în acest domeniu. (bucșe, coloane, aruncătoare, plăci etc).

Prin urmare pentru concepția și realizarea matriței trebuie să se cunoască următorul algoritm: proiectarea matriței cu specificația că aceasta depinde de dimensiunile și forma pastilelor, realizarea plăcilor de formare, realizarea plăcilor de prindere respectiv a plăcilor distanțiere, a coloanelor de ghidare și bușelor de ghidare dacă este necesar, realizarea sistemului de aruncare al matriței și respectiv realizarea duzei. Dacă este posibil se preferă ca duza matriței să fie achiziționată de la o firmă specializată (Hasco, DME, Meusburger, Moldmaster etc) și să fie prelucrată ulterior deoarece realizarea unei duze este deseori costisitoare și de lungă durată, în speță realizarea conicității interioare a duzei.

În acest scop, din dorința de a realiza o matriță care să respecte funcționalitatea și caracteristicile specifice procedurii de microinjectare și din considerente economice s-a optat pentru fabricarea unui prototip sau a unei machete destinată microinjectării din material polimeric care să reprezinte un punct de plecare respectiv un exemplu pentru viitoarele matrițe din oțel sau aluminiu destinate procedurii. Din comerț au fost achiziționate un număr de două plăci de poliamidă care au fost debitate ulterior respectiv prelucrate prin frezare.

Pentru început a fost realizat un element activ amovibil (pastilă amovibilă) la cotele prezentate în subcapitolul 5.3., pe aceasta fiind frezată o rețea de tip H cu canale de 2, 1,5 respectiv 1mm, după care s-au realizat plăcile de formare respectiv celelalte elemente componente. Din figura 7.3 se pot observa dimensiunile pastilei respectiv a plăcilor matriței realizate, dimensiuni care se pot modifica relativ repede dacă este nevoie datorită materialului ușor de prelucrat.

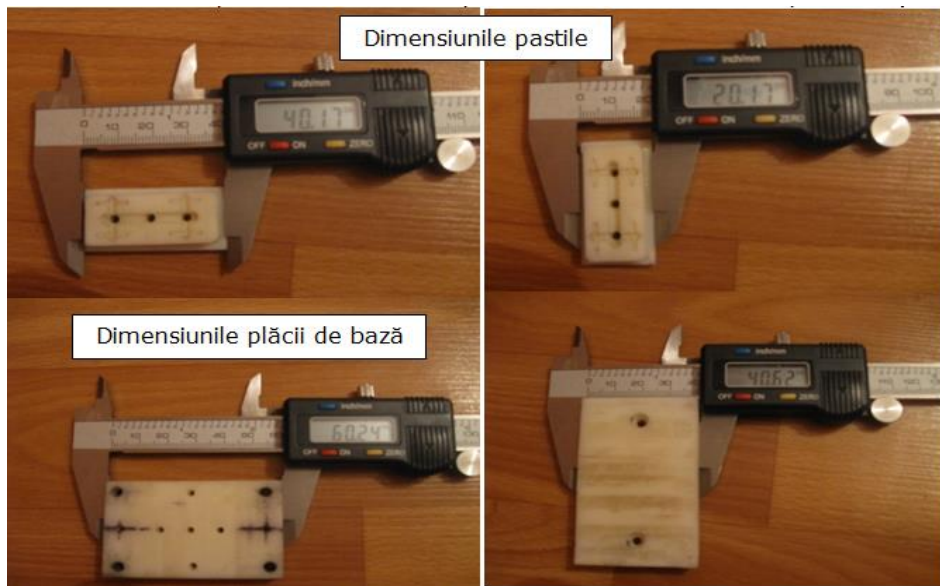


Fig. 7.3. Dimensiunile pastilei și a plăcilor matriței din material plastic

La realizarea plăcilor matriței freza utilizată pentru acestea a avut diametrul de 6mm și s-au utilizat diverse burghie de diferite dimensiuni pentru realizarea găurilor existente în plăci. De asemenea un rol important a fost asigurarea coaxialității găurilor pentru coloanele de ghidare și șuruburile de prindere, ceea ce a determinat ca prelucrarea să fie realizată "la pachet". Realizarea coloanelor de



ghidare ale matriței s-a făcut pe un strung în miniatură, acestea fiind din alamă, prevăzute cu canale pentru ungere iar diametrul acestora a fost de 4mm.

În figura 7.4 sunt prezentate o serie de imagini care sugerează principalele elemente componente ale machetei/matriței realizată din material polimeric pentru microinjectare. Din imaginile figurii de mai jos se pot evidenția coloanele matriței de culoare galbenă realizate din alamă, subansamblul duză-placă de prindere pe platoul fix al mașinii de injectat, cele două plăci distanțiere, pastila matriței, diverse tipuri de șuruburi de culoare neagră pentru asamblarea componentelor matriței, plăcile de formare ale acestora dintre care una ce prezintă buzunarul în care se introduce/asamblează pastila și subansamblul sistemului de aruncare ce conține placa aruncătoare, placa port-aruncătoare, aruncătoarele destinate evacuării piesei din matriță precum și coloanele readucătoare.

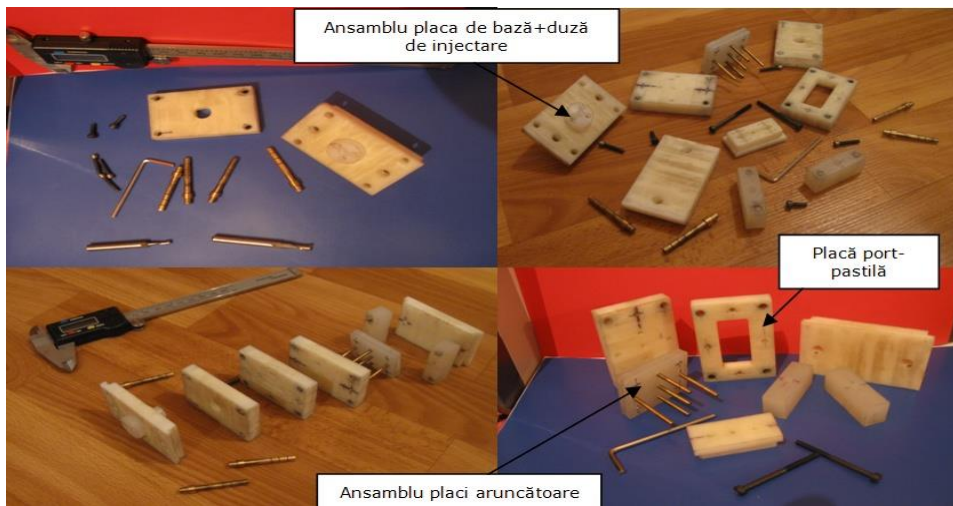


Fig. 7.4. Componentele matriței din material polimeric

Majoritatea elementelor componente ale acestei matrițe realizate din poliamidă au fost prelucrate pe microfreză MF70 cu freze cu diametre cuprinse între 0.8-6mm. De asemenea prezența unei chei imbus sau a șublerului electronic în figură nu este întâmplătoare acestea punând în evidență dimensiunile reduse ale matriței respective. Dacă în figura anterioară se prezentau elementele componente ale matriței într-o manieră singulară sau neasamblate figura 7.5. prezintă elementele componente ale acestora în subansamblul fix respectiv subansamblul mobil al matriței.

Subansamblul fix al matriței este realizat din duză, placa de prindere pe platoul fix al mașinii, placa de formare respectiv cele patru coloane de ghidare, asamblate prin intermediul a două șuruburi scurte cu cap imbus. Duza matriței este fixată în placa de prindere a matriței prin intermediul a trei șuruburi M2.

Subansamblul mobil al matriței se compune din placa de prindere pe platoul mobil al mașinii, placa de formare a poansonului, o placă intermediară și plăcile distanțier. Cele patru tipuri de plăci prezentate sunt asamblate cu ajutorul a două șuruburi M3 de lungime mare. Pe lângă plăcile amintite anterior subansamblul mobil mai conține și sistemul de aruncare al matriței. Acesta se constituie din placa aruncătoare și placa port-aruncătoare asamblate cu ajutorul a patru șuruburi scurte.



Sistemul de aruncare al matriței conține trei aruncătoare cu un diametru de 2mm special proiectate pentru o eliminare centrată a rețelei din matriță și două coloane readucătoare la diametru mai sus amintit pentru readucerea sistemului de aruncare în poziția inițială (zero) la închiderea matriței. Tot pentru un studiu comparativ, una dintre imaginile figurii prezintă faptul că lungimea respectiv lățimea matriței nu depășește cu mult dimensiunile unui telefon mobil.

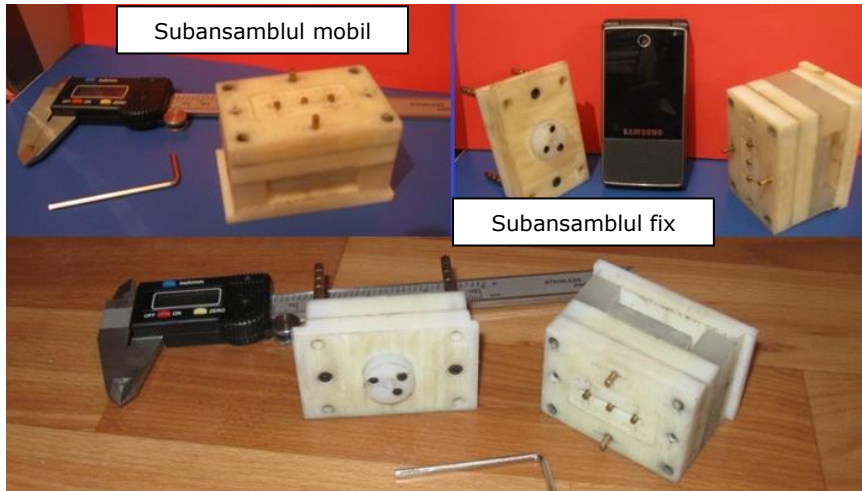


Fig. 7.5. Subansamble ale matriței în diverse ipostaze

Din figurile prezentate anterior se constată că matrița din poliamidă nu este asamblată în întregime ci în subansamble, fapt pentru care este nevoie să se prezinte respectiva matriță în întreg ansamblu. Figura 7.6. prezintă ansamblul întredeschis al matriței realizate din poliamidă.

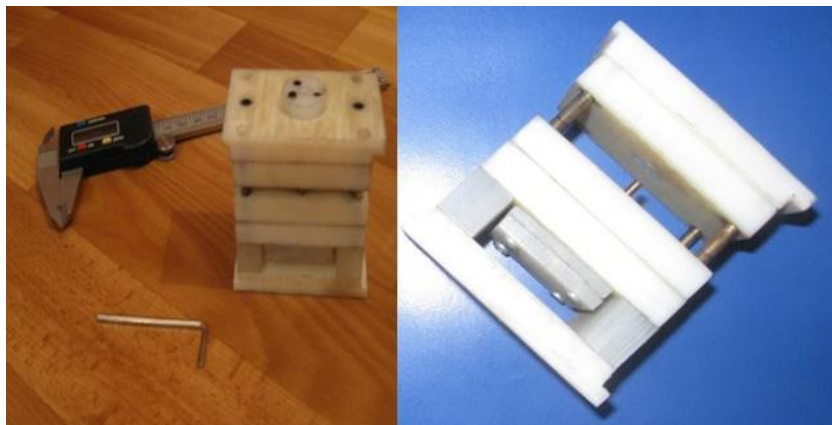


Fig. 7.6. Matrița pentru microinjectare asamblată.

Realizarea matriței din material plastic s-a făcut într-un timp relativ scurt după ce au fost dobândite cunoștințele fundamentale privind prelucrarea cavităților de dimensiuni mici respectiv a pieselor miniaturale specifice matrițelor pentru microinjectare. Această matriță nu a fost concepută în scop de realizare a unor

încercări de repere sau rețele injectate cu silicon sau cu alt material care să nu afecteze pereții pastilei ci doar ca exemplu de dimensionare aproximativă a unei matrițe viitoare realizată din aluminiu sau oțel în miniatură. De asemenea în cazul unor greșeli de proiectare costurile de remediere a pieselor din poliamidă ar fi fost cu mult reduse privind materialul de prelucrat dar și uzura sculelor folosite.

### 7.3 Fabricarea diverselor tipuri de pastile amovibile

În cadrul tezei de doctorat unul dintre principalele obiective propuse ce trebuiesc a fi rezolvate îl reprezintă realizarea matriței pentru microinjectare și respectiv a părților active ale acesteia: cavități respectiv poansoane.

Unul dintre principalele elemente ale matriței îl reprezintă elementele active sau pastilele amovibile ale acesteia care pot să aibă un aspect simplu sau mai complex. Așa cum evidențiază și titlul tezei de doctorat „Studiul curgerii materialului plastic prin rețele și cavități cu aplicație la microinjectare”, principala problemă în acest caz este proiectarea și realizarea unor tipuri de rețele precum și a unor tipuri de cavități de dimensiuni reduse care să reprezinte suportul experimental sau practic al respectivei teze de doctorat.

Înainte realizării unor tipuri de pastile amovibile s-au efectuat o serie de pastile care nu respectă dimensiunile pastilelor concepute inițial. Prin urmare înainte de realizarea pastilelor amovibile se vor prezenta două din pastilele ce au fost realizate, acestea având cavități de formă simplă și sunt realizate pe mașini clasice tocmai pentru a observa modul de comportare al sculelor așchietoare de diametre mici pe materiale ca aluminiu sau oțel. Pentru realizarea modelului fizic al acestor prototipuri de pastilă se utilizează ca mașină de prelucrat microfreza MF70. În figura 7.7 sunt prezentate semifabricatele disponibile pentru realizarea pastilelor propuse și sculele utilizate. Astfel din figură semifabricatul de tip disc de prelucrat este din duraluminiu iar cel de formă prismatică este din oțel.



Fig 7.7. Model brut de pastilă

Pastila de tip disc din duraluminiu se prelucrează, pe mașina de frezat MF70 prin prinderea acesteia în bride pe masa mașinii, cu freze deget din tungsten așa cum se prezintă din figură având diametre de 3, 2 și 1 mm. Diametrul pastilei are valoarea de 36mm iar înălțimea acesteia 7mm. Asupra piesei brute se realizează o degroșare destinată obținerii unei planeități a suprafeței precum și a luciului metalic.

Datorită faptului că semifabricatul respectiv nu avea o planeitate determinată s-a trecut la realizarea unei prelucrări de degroșare conform figurii 7.8 din care se poate observa adâncimea mică pe care s-a realizat aceasta precum și urma lăsată de sculă pe piesă. Degroșarea în cauză s-a realizat la o adâncime de 0.2mm din patru treceri. Conform cu ceea ce recomandă producătorul mașinii de

frezat MF70 în cazul prelucrării aluminiului se utilizează o turație de aproximativ 20 000 rot/min (18000 în cazul de față) și o ungere consistentă.

De asemenea în urma prelucrării degroșării pe ambele părți ale piesei se trasează o delimitare la 6mm distanță față de extremitățile discului prin două drepte paralele care vor servi mai apoi la realizarea unor buzunare destinate unei prinderi ferme și a unei fixări mai bune pe masa de prelucrat a mașinii. Adâncimea folosită pentru realizarea umerilor respectivi a fost în acest caz de 2 mm. Prinderea ulterioară, după realizarea umerilor pe masa mașinii este evidentă în figură.

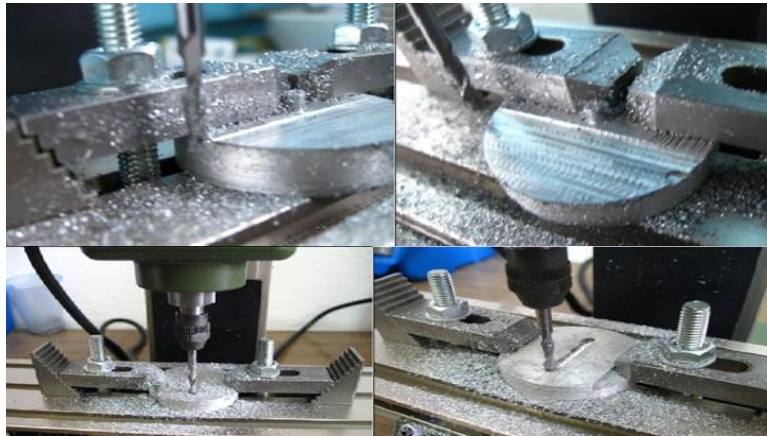


Fig 7.7. Degroșarea și prinderea ulterioară a pastilei

Pe pastilă a fost trasat modul de lucru pe care se vor prelucra canalele de distribuție destinate realizării unei rețele de tip H. Cu pastila fixată pe masa mașinii de frezat așa cum se arată în figura 7.7. prelucrarea începe din centrul piesei unde inițial a fost realizată o gaură de 3mm pe o adâncime de 3mm. Se prelucrează apoi un canal de 3mm pe o adâncime de 2mm care va reprezenta canalul de distribuție principal a cărui lungime este de 20mm între axe. La distanța de 10mm funcție de axa centrală a piesei se prelucrează un canal de distribuție secundar perpendicular pe canalul de distribuție principal realizat anterior. Forma obținută este conform literei T și se prezintă în figura 7.8.

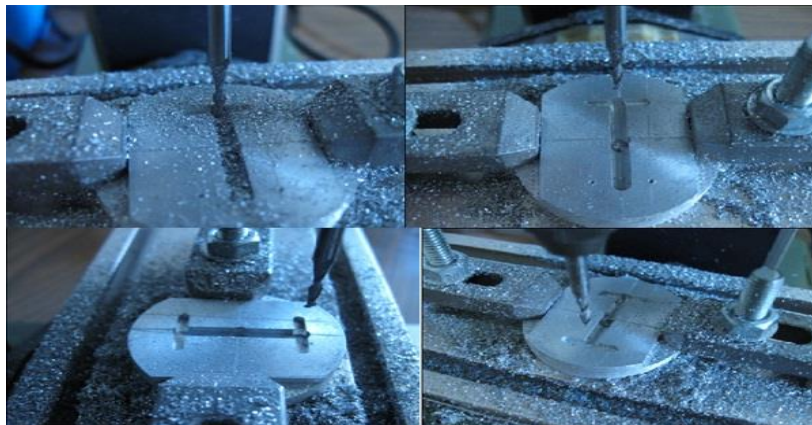


Fig. 7.8. Frezare canal de distribuție T și H

Scula utilizată la realizarea acestui canal de distribuție secundar este de 2mm diametru iar adâncimea la care s-a realizat aşchiera este de 3mm. Lungimea canalului secundar de distribuție este de 10mm. Turația utilizată în acest caz la prelucrarea cu scula de 2mm este de 20 000rot/min. Canalul de distribuție secundar s-a prelucrat din mai multe treceri, adâncimea de aşchiere utilizată fiind în principal de 0.1mm Scula aşchietoare realizează apoi acelaş tip de canal de distribuție secundar în celălalt capăt al canalului de distribuție principal realizat anterior, astfel încât se obține o rețea de forma literei H specifică înjecției a patru cuiburi simultan. Pentru realizarea adâncimii de 3mm sculele aşchietoare din tungsten utilizate s-au comportat corespunzător la prelucrarea în acest material nefiind nevoie înlocuirea acestora. Problema în acest caz au constituit-o timpii de prelucrare datorită utilizării multor treceri succesive la adâncime mică. Pentru o imagine de ansamblu cât mai reală asupra pastilei realizată se observă în figura 7.9. diverse comparații între canalele de distribuție realizate și o agrafă respectiv o monedă de 10 bani. Diametrul monedei respective este de 20,5mm iar concluziile ce se pot trage în acest sens sunt evidente.



Fig 7.9. Comparație realizată între pastilă agrafă și monedă

Prin urmare canalele de distribuție nu au o lungime mai mare decât lungimea agrafei iar diametrul monedei de 10bani acoperă aproape în întregime suprafața prelucrată. Datorită faptului că adâncimea canalului de distribuție secundar are valoarea de 3mm se realizează și un alt canal de distribuție secundar la fiecare capăt al canalului secundar anterior. Acest ultim canal de distribuție secundar se realizează cu o freză cu un diametru de 1mm. Amplasarea acestuia se ia în raport cu axa longitudinală a primului canal de distribuție realizat și se realizează la 5mm față de aceasta axă. În funcție de axa transversală a primului canal de distribuție principal realizat canalul de distribuție secundar ultim este situat la 10mm față de aceasta. Adâncimea acestui canal de distribuție secundar este de 1mm iar lungimea acestuia are valoarea de 6mm.



Fig 7.10. Realizarea rețelei și forma finală



În figura 7.10. se poate observa modul de dispunere și realizare a ultimelor canale secundare ale rețelei de tip H specifice injectării a opt piese simultan. În acest caz la prelucrarea ultimului canal s-a utilizat o turație de 18.000rot/min iar avansul de pătrundere a fost de 0.1mm. De asemenea figura este reprezentativă pentru forma finală a pastilei.

Următoarea pastilă realizată este din oțel conform cu semifabricatul din figura 7.7 și prelucrările adecvate acesteia au fost efectuate pe aceeași microfreză MF70. Dimensiunile acesteia respectă dimensiunile impuse la proiectarea pastilelor amovibile adică Lxlxh (40x20x12mm).

Figura 10.11 prezintă modalitatea de prindere inițială a semifabricatului în vederea prelucrării umerilor pastilei conform modelului I de pastilă proiectată. În acest sens semifabricatul este fixat pe masa mașinii cu bride, forța de strângere a acestora fiind situată/acționând undeva la centrul semifabricatului. După fixarea semifabricatului pe masa mașinii se trece la realizarea umerilor prezentați în figură. Se utilizează o freză având un diametru de 3mm cu care se prelucurează o suprafață de 8mm lungime și 8mm adâncime. Turația utilizată la prelucrarea acestui tip de pastilă din oțel pe această mașină este de 12000rot/min. Prelucrarea umerilor se realizează din mai multe treceri, adâncimea de prelucrare utilizată fiind de 0.3mm. La ultimul mm ca adâncime de prelucrare se realizează finisarea prin utilizarea unei adâncimi de prelucrare de 0.1mm. După realizarea primului umăr al pastilei se trece la realizarea următorului umăr al acesteia utilizându-se același principiu de prelucrare. Avantajul major în acest sens îl reprezintă faptul că prelucrarea umerilor respectivi s-a realizat la o singură prindere a semifabricatului ceea ce a făcut ca erorile de prelucrare să fie minime.

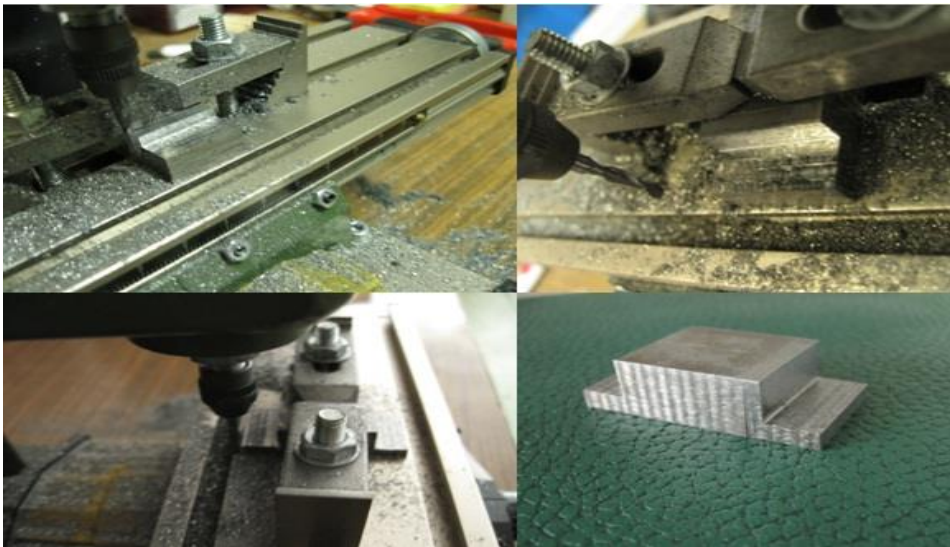


Fig.10.11. Prinderea și prelucrarea semifabricatului prismatic

În figură se prezintă modelul fizic al pastilei proiectate de tip I înaintea prelucrării canalelor de distribuție ale rețelei. Cu pastila realizată în acest mod este mult mai simplu să se realizeze cavitățile dorite deoarece piesa în cauză poate fi fixată mult mai ușor pe masa mașinii de frezat datorită umerilor realizați. Dar înainte de a fixa pastila pe masa mașinii de frezat se realizează trasarea piesei.

Figura 10.12 prezintă întreg procedeu de prelucrare al cavității rețelei pentru acest tip de pastilă, procedeu prezentat în întregime în cele ce urmează.

După ce s-a realizat trasarea piesei aceasta este fixată pe masa mașinii așa cum se prezintă în figură și se începe prelucrarea. Se dorește realizarea unei rețele de tip X cu canale de distribuție secundare pentru umplerea simultană a opt piese. Astfel se începe cu prelucrarea primului canal de distribuție principal pentru care se utilizează o freză de 3mm diametru. Adâncimea acestui canal este de 2mm iar lungimea totală a acestuia este de 18mm. Adâncimea de pătrundere utilizată în acest caz pentru realizarea canalului a fost de 0.2mm. În urma realizării primului canal de distribuție sunt realizate canalele de distribuție secundare paralele cu acest prim canal de distribuție principal. Pentru realizarea acestor canale de distribuție s-a utilizat o freză cu un diametru de 1mm. Adâncimea acestor canale secundare este de 0.8mm iar lungimea totală a acestora este de 6mm.

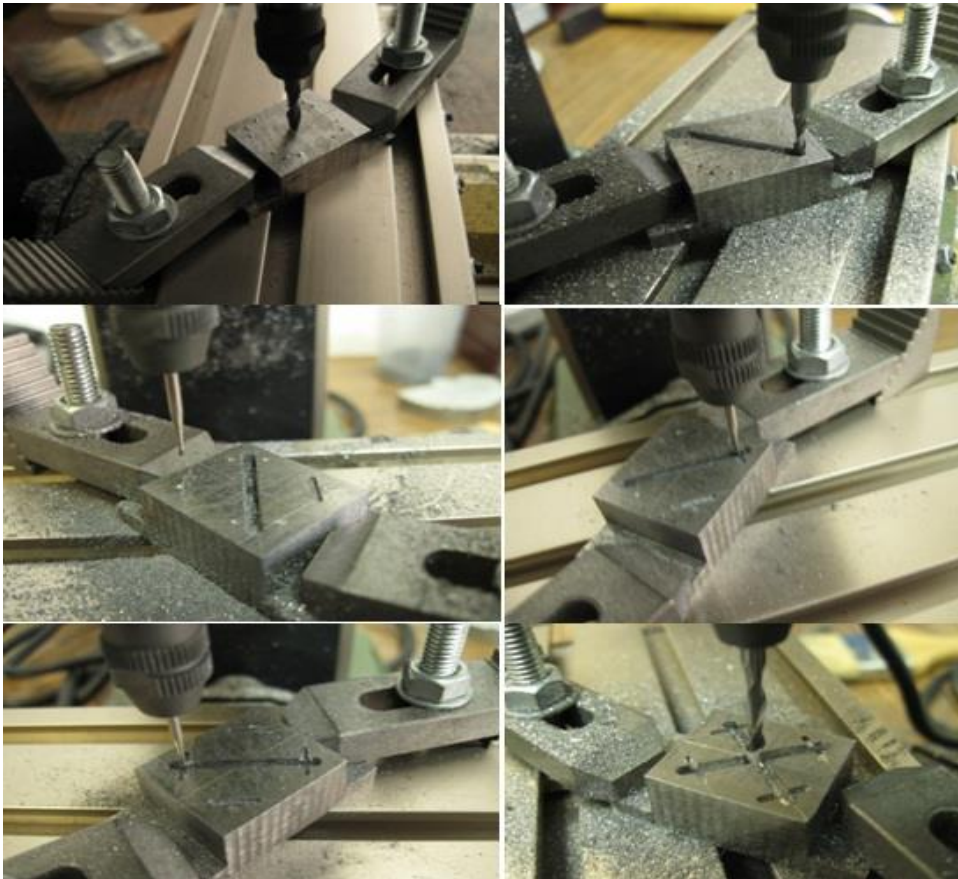


Fig. 10.12. Procedeu de prelucrare al rețelei de tip X

În urma realizării celor două canale de distribuție secundare amintite anterior sunt prelucrate următoarele două canale de distribuție secundare perpendiculare pe canalul de distribuție principal realizat. Obținem astfel conform penultimei imagini a figurii cinci cavități realizate și suntem nevoiți să realizăm ultima prelucrare de cavitate pentru obținerea rețelei anume a doua rețea de

distribuție principală. În urma realizării celui de-al doilea canal de distribuție principal piesa rezultă conform cu ultima imagine a figurii. Specific faptul că pentru realizarea acestui tip de rețea două dintre frezele cu diametrul de 1mm au cedat fiind nevoie înlocuirea acestora. În urma procedurii de frezare al piesei aceasta a fost supusă unui procedeu de lustruire cu ajutorul unei perii din oțel așa cum se observă în figura 10.13. Dacă la frezare turația utilizată a mașinii a fost de 10000-12000rot/min în cazul lustruirii turația utilizată a fost de 16000rot/min. Figura 10.13 prezintă de asemenea forma finală a pastilei propuse precum și comparația acesteia cu o agrafă specifică domeniului biroticiei.

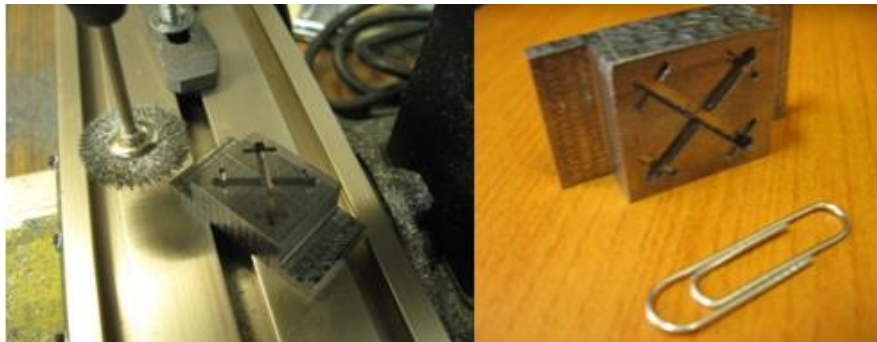


Fig. 10.13. Lustruirea și varianta finală a pastilei

În urma observațiilor realizate privind exploatarea sculelor așchietoare de dimensiuni/diametre mici în diverse condiții de prelucrare (pe diferite materiale) s-a hotărât încercarea acestor scule miniaturale pe mașinile cu comandă numerică din dotarea laboratoarelor de Prototipare Rapidă respectiv Plasturgie. Pe aceste mașini de frezat se vor realiza o serie de pastile amovibile, destinate utilizării pe o matriță de microinjectat, realizate din materiale ca aluminiu respectiv oțel. [Rotar\_b, 2010]

Figura 7.14. prezintă o primă pastilă amovibilă concepută și realizată care reprezintă o rețea de tip "tab gate" dig cotit cu două piese plate destinate studiului curgerii laminare.

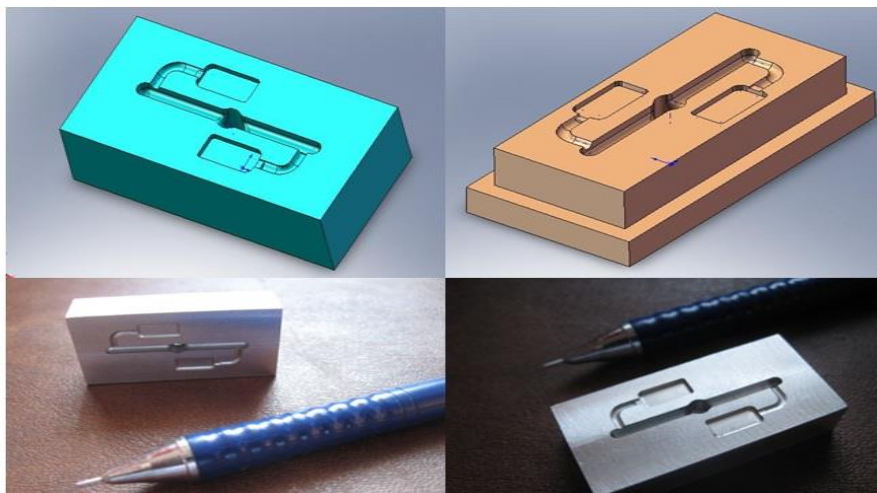


Fig.7.14. Pastila specifică Tab gate.



Pastila amovibilă este proiectată în mediul SolidWorks și are o lungime de 40mm, o lățime de 20mm și o înălțime de 10mm. Figura prezintă pastila proiectată în 3D în două ipostaze în primul caz fiind doar prelucrarea cavităților respectiv a rețelei fără realizarea frezării laterale a pastilei adică evidențierea umerilor acesteia iar în cazul următor se prezintă pastila așa cum se dorește realizată fizic având acele margini laterale frezate în scopul fixării acesteia în placa de formare a matriței. În urma proiectării pastilei se dorește realizarea fizică a acesteia astfel încât se va realiza programul CAM specific mașinii de frezat ISEL GFM 4433 din dotarea laboratorului utilizând interfața EdgeCam. [Edgecam], [Isel]

În urma generării programului în soft înainte de a se trece la implementarea acestuia pe mașina de frezat se alege materialul pastilei, în cazul de față se utilizează aluminiu, semifabricatul fixându-se în menghina mașinii și se realizează o simulare a prelucrării piesei respective. Pe lângă pastila amovibilă realizată în 3D figura prezintă pastila ca model fizic obținut, în comparație cu un creion mecanic, pentru aceasta fiind necesare un număr de aproximativ șase ore de lucru.

O altă pastilă amovibilă concepută o reprezintă cea cu cavitatea de tip stea destinată umplerii a cinci piese simultan realizată, de asemenea din aluminiu pe mașina de frezat ISEL GFM 4433. În cazul acestei pastile amovibile cotele de gabarit sunt aceleași cu cele prezentate anterior iar scula utilizată la realizarea cavității a fost o freză de 1mm diametru de prelucrare, partea de prindere a acesteia fiind de 3mm. Figura 7.15. prezintă diverse faze din procesul de prelucrare al acestei pastile precum și o comparație a acesteia cu o monedă de 50 de bani amplasată pe falca fixă a menghinei mașinii. Dacă primele două imagini sunt reprezentative pentru partea de prelucrare a pastilei respective ultima imagine a figurii prezintă pastila amovibilă terminată din punct de vedere al prelucrării. De asemenea se poate observa faptul că pastila are dimensiuni reduse datorită comparației acesteia cu un stick de memorie și o monedă.

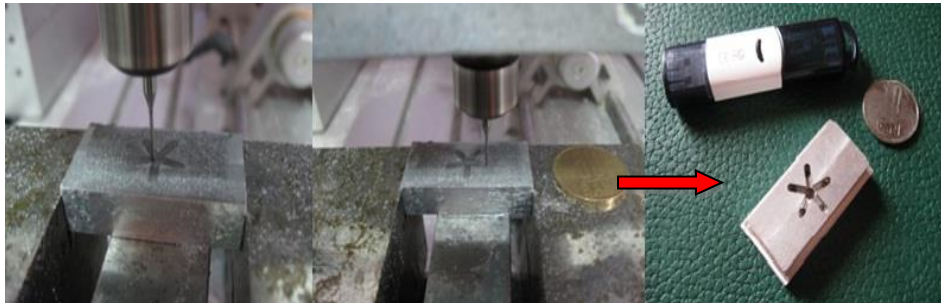


Fig.7.15. Prelucrarea pastilei cu cavitatea de tip stea

Pentru fabricarea acestui tip de pastilă timpul total de prelucrare a fost de cca. 4ore. Astfel la degroșare programul CAM a prezentat aproximativ 12000 de fraze și la finisare numărul de fraze a fost de aproximativ 18000.

Pentru o piesă de tip suport sau șampilă de dimensiuni reduse s-a proiectat o pastilă cu două cuiburi. Figura 7.16 prezintă piesa ce se dorește a fi realizată prin procedeul de microinjectare, greutatea acestei piese fiind de 0.04g aceasta fiind încadrată în piesele specifice la microinjectare a căror greutate este sub un gram.

Dimensiunile piesei prezentate ce se dorește a fi obținută sunt lungimea de 6mm, lățimea 2mm iar înălțimea totală a piesei 4mm dintre care 1 mm înălțime o reprezintă partea de suport mai subțire și cu dimensiuni mai mari. [Șerban, 2011]

Pe lângă piesa dorită figura prezintă și proiectarea pastilei în 3D. Așa cum s-a prezentat și în cazul pastilei de tip tab gate figura inițială prezintă pastila prelucrată în ipostaza fără umăr. Astfel la aceasta au fost prelucrate prin frezare doar cavitățile aceasta nefiind apoi în forma finală. Pentru montarea pastilei amovibile în placa de formare a matriței este necesar să se prelucreze marginile pastilei astfel încât aceasta să poată fi fixată în buzunarul/locașul special frezat al plăcii de formare. Dimensiunile de gabarit ale pastilei amovibile sunt aceleași cu ce a fost prezentat anterior iar diametrul rețelei de injectat are 2mm, cu o lungime totală de 20mm, digul având o lățime de 1.2mm cu lungimea de 1.5mm.

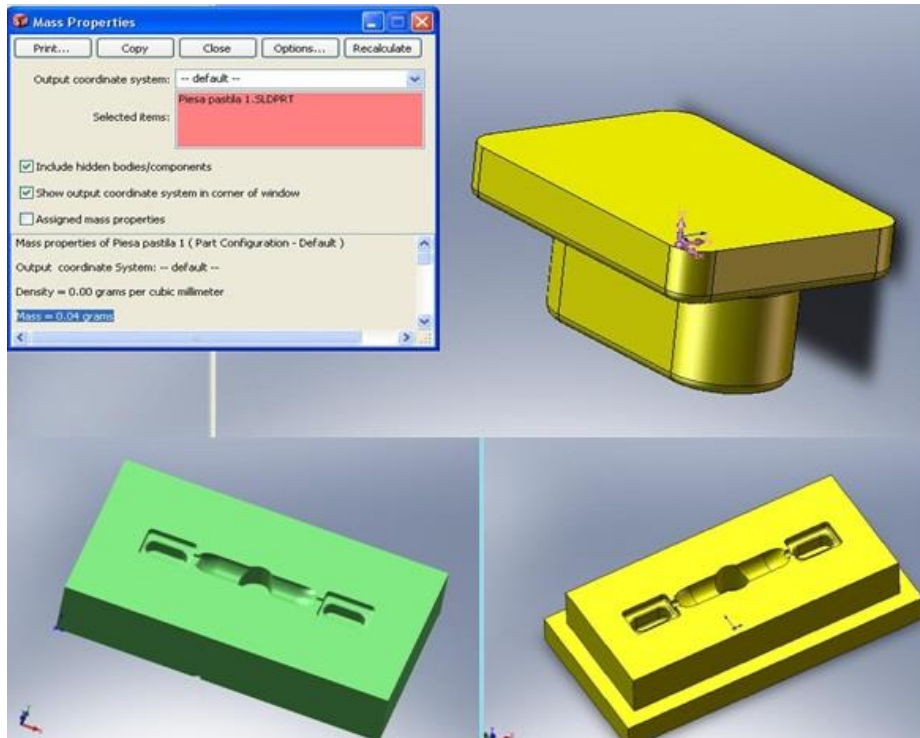


Fig. 7.16. Greutatea piesei și modelul CAD al pastilei dorite

În urma proiectării pastilei se realizează programul CAM pentru aceasta în vederea realizării fizice. Programul utilizat în acest scop este EdgeCam și în urma realizării acestuia se urmărește o simulare pe calculator a programului astfel încât să se facă corecții de sculă dacă este necesar sau să se observe dacă sunt erori în cadrul rulării acestuia. De regulă nu ar trebui ca un program realizat în CAM să fie cu erori dar acest fapt se poate datora unor scăpări ale inginerului în acest domeniu, a unor scule incorect utilizate sau a unor setări greșit introduse în program. Un "ochi format" în acest domeniu de programare numerică poate să detecteze foarte repede o greșală și să o remedieze în timp util.

În figura 7.17 sunt prezentate diverse faze de simulare a programului pastilei amovibile realizat în EdgeCam. Astfel din prima figură se poate observa modul cum scula prelucrează semifabricatul prin realizarea primei cavități a piesei urmată de frezarea rețelei și de următoarea cavitate echivalentă piesei. Dacă prima imagine a figurii evidențiază modul de realizare a prelucrărilor piesei următoarea

figură prezintă traseul generat pe care îl are scula așchietoare în timpul prelucrării precum și retragerea acesteia pe Z la o înălțime dată deasupra piesei de prelucrat, înălțime aleasă de programator din considerente de siguranță. Figura mai prezintă diverse stadii de frezare ale sculei și suprafața rezultată astfel încât aceasta este echivalentă cu suprafața prelucrată în realitate. [Rotar\_b, 2010]

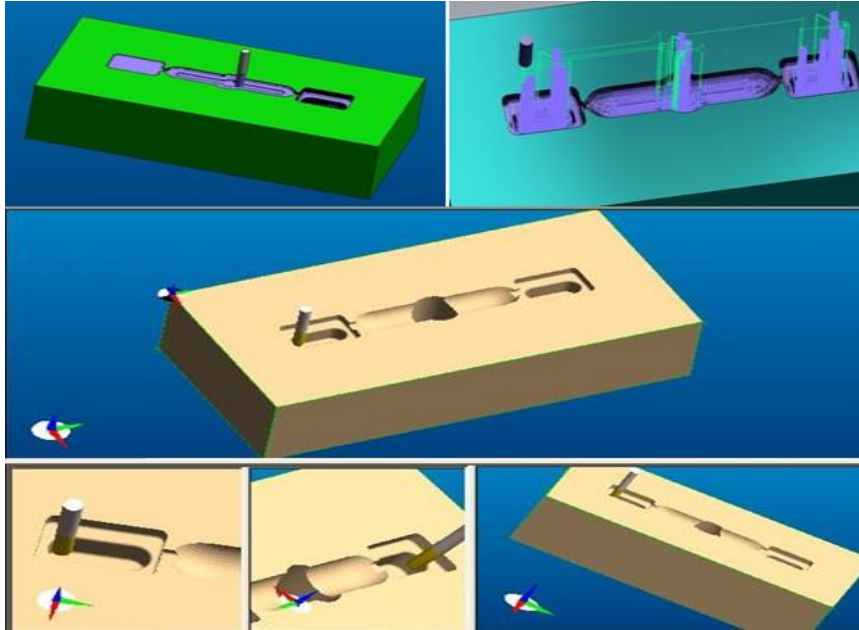


Fig. 7.17. Simulare în CAM a pastilei cu două cuiburi [Rotar\_b, 2010]

În urma realizării simulării programului CAM și a corecțiilor de rigoare efectuate acesta se încarcă pe mașina unealtă în cazul nostru ISEL GMF 4433 și se realizează frezarea. Programul realizat pentru degroșare a avut un număr de aproape 18000 de fraze și un timp de prelucrare de 3 ore. Finisarea în acest caz a prezentat un număr de 26000 de fraze și un timp de prelucrare de cca 4 ore și jumătate. Turația la care a fost realizată prelucrarea a fost de 12000rot/min. În timpul funcționării nu au avut loc evenimente nedorite ca ruperea sculei/frezei sau oprirea mașinii în timpul funcționării programului.



Fig. 7.18. Pastila fabricată cu două cuiburi

Piesa rezultată în urma prelucrării este prezentată în figura 7.18. În diverse ipostaze comparațiile cu monede respectiv agrafa de birotică fiind mai mult decât sugestive privind dimensiunile piesei din interiorul pastilei.

Pe lângă cele trei pastile amovibile din aluminiu cu rețelele prezentate anterior au mai fost fabricate alte două pastile din același material. Cavitatarea uneia dintre pastile are forma literei S (rețea destinată umplerii simultane a patru cuiburi) iar cealaltă este o rețea cu două cuiburi cu piese în trepte la care digul utilizat este unul de tip evantai. Figura prezintă cele două tipuri de pastile realizate, prima cu rețeaua în forma de S neterminată încă din punct de vedere al prelucrării iar cealaltă cu piesa în trepte la stadiul final.



Fig.7.18. Alte pastile specifice pentru încercări la microinjectare

Pastila amovibilă cu rețea în formă de S prezintă un canal de distribuție principal respectiv două canale de distribuție secundare. Canalul de distribuție principal are o adâncime de 2.5mm și a fost realizat cu o freză deget cu un diametru de 2mm. Lungimea totală a acestui canal de distribuție este de 24mm. Canalele de distribuție secundare sunt realizate cu o freză cu un diametru de 1mm pe o adâncime de 1mm.

Pastila amovibilă cu piesa în trepte se realizează pentru a efectua un studiu al curgerii materialului polimeric de la o grosime de perete mai mare la o grosime de perete mai mic prin trepte succesive. În cazul acestei matrițe canalul rețelei a fost realizat cu o freză de diametru de 3mm pe o adâncime de 2mm și pe o lungime totală de 16mm. Digul este unul de tip evantai și are o adâncime de 0,6mm și o lungime de 4mm. Dimensiunea acestuia în apropierea rețelei este de 2mm iar în imediata vecinătate a piesei este de 6mm. Piesa are o adâncime maximă de 2mm iar treptele sunt din 0.5 în 0.5 lungimea uneia fiind de 10mm iar lățimea de 1.5mm.

Figura prezintă cele două pastile în comparație cu un memory stick respectiv cu o monedă de 10 bani.

Pastilele amovibile din aluminiu prezentate anterior sunt doar o parte din întregul proiect conceput ce se doresc a fi realizate existând și alte tipuri de rețele și cavități proiectate sau în curs de proiectare ce urmează a fi realizate cu acest material utilizat. Pe lângă pastilele amovibile realizate din aluminiu prezentate se evidențiază și pastila amovibilă din oțel din figura 7.19. Este adevărat că această pastilă nu prezintă dimensiunile de gabarit prezentate în cazul celorlalte pastile amovibile din aluminiu. Dimensiunile de gabarit ale acestui tip de pastilă sunt 56x30x18mm (Lxlxh). Această pastilă amovibilă se realizează pe mașina de frezat ISEL Premium 3020. Pastila prezintă un umăr destinat fixării acesteia în placa de formare a matriței. Din proiectare acest umăr este realizat la o adâncime de 8mm pe o distanță de 2mm. Canalul de distribuție a fost proiectat pentru prelucrarea cu o

freză de 3mm la o adâncime de 1,5mm. Lungimea totală a canalului de distribuție este de 34mm. Canalele de distribuție secundare au o lățime de 2mm, o adâncime de 1mm și o lungime de 2,5mm. Piesa care se găsește în pastilă are o lungime de 8mm, o lățime de 4mm și o adâncime de 1,5mm. Digul utilizat are o lățime de 1,2mm, o adâncime de 0,6mm și o lungime de 0.9mm. După proiectarea pastilei se realizează în mediul ProEngineer programul CAM pentru realizarea frezării piesei. Astfel la începutul programului se alege scula cu care dorim să realizăm prelucrarea după care se alege originea piesei și parametrii de aşchiere adecvați.

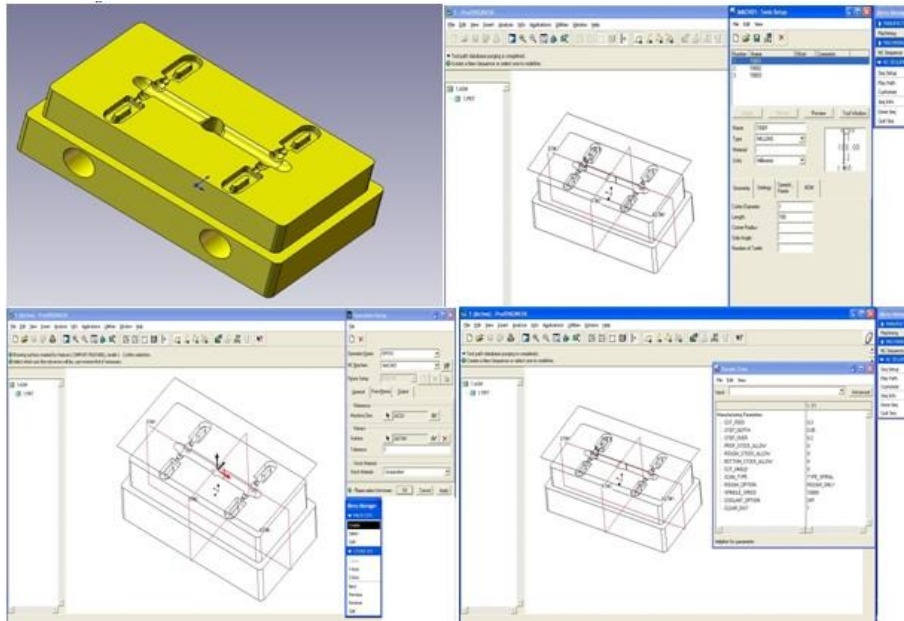


Fig. 7.19. Pastila proiectată, alegerea sculei și a regimurilor de aşchiere

În figura 7.20 se prezintă traiectoria sculei aşchietoare cu diametrul de 3mm cu care se va prelucra doar canalul de distribuție principal. Pentru această prelucrare se utilizează o freză deget cu un diametru de 3mm cu care se va realiza degrosarea după care pentru finisare se utilizează o freză cu cap sferic cu raza de 1.5mm acoperită cu titan. Turația utilizată la prelucrare este de 12000rot/min.

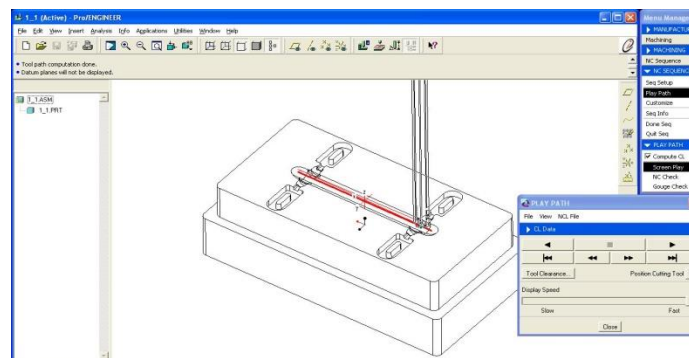


Fig. 7.20. Frezarea canalului de distribuție cu freza cu cap sferic



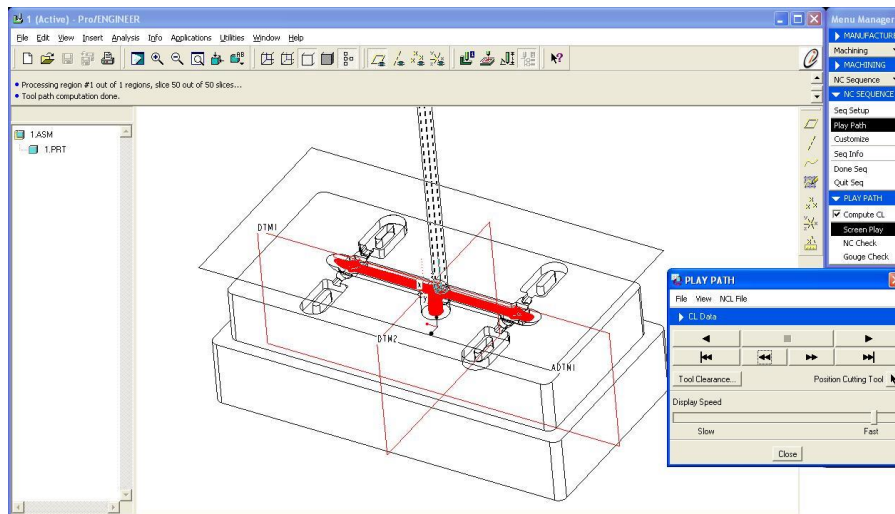


Fig. 7.21. Realizare canalelor de distribuție secundare.

După frezarea canalului de distribuție principal se realizează frezarea canalelor de distribuție secundare (fig 7.21.) cu o freză cu un diametru de 2mm. Cu acest tip de freză se realizează doar degroșarea turația utilizată fiind de 10000rot/min.

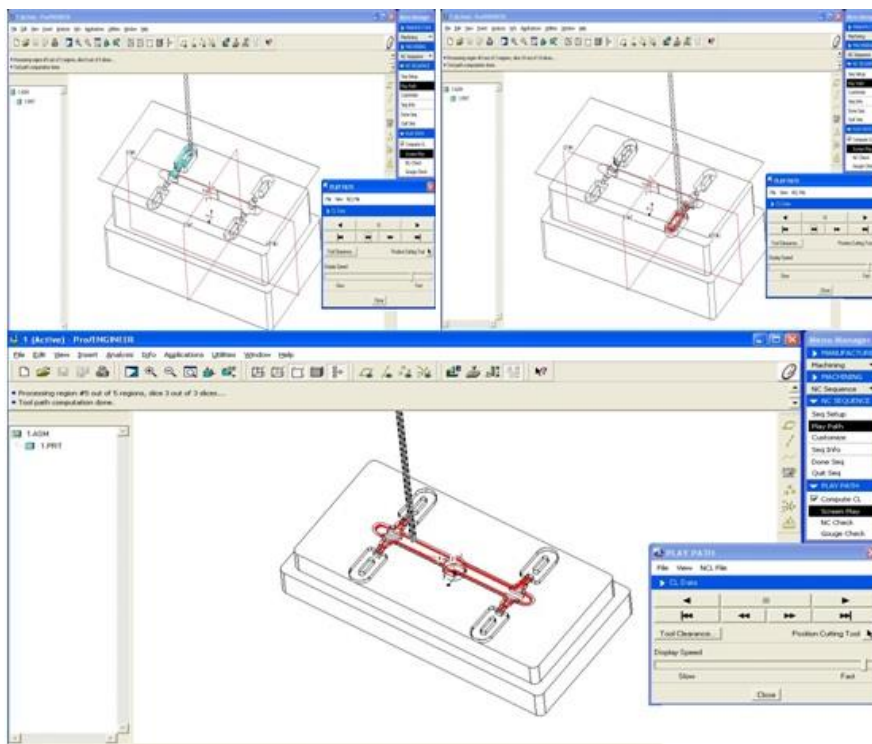


Fig. 7.22. Realizare cavități și finisare



În urma realizării canalelor de distribuție secundare se realizează schimbarea de sculă cu o sculă cu diametru de 1mm pentru realizarea cavităților piesei. Apoi prelucrarea digurilor și finisarea canalelor de distribuție secundare sunt realizate cu o freză de diametru de 0.9mm. Prelucrarea cavităților cu freza de 1mm respectiv finisarea cu freza de 0.9mm este pusă în evidență în figura 7.22. La finisare a fost utilizată o turație de aproximativ 20000rot/min pentru realizarea unei suprafețe cu rugozitate mică. Timpul total de prelucrare al acestei piese a fost în jurul a 10 ore.

Pastila amovibilă realizată din oțel este prezentată în figura 7.23. în diverse ipostaze pentru trecerea în revistă a dimensiunilor acesteia. Se observă diversele comparații realizate între pastilă și memory stick, monede, o cheie iar în final un mouse de calculator. Dimensiunile pastilei sunt evidente iar ale piesei care se doarec a fi obținute din această pastilă sunt și mai evidente. Dezavantajul la prelucrarea în acest caz a fost că mașina unealtă a trebuit să fie oprită în timpul rulării programului de prelucrare la degroșare deoarece au fost ceva probleme la realizarea primei cavități (se consideră că a fost utilizată o adâncime de prelucrare prea mare pentru diametrul sculei ceea ce a făcut ca aceasta să flambeze). A existat astfel o tendință a sculei să realizeze aceeași cavitate într-o dublă ipostază la o distanță de 1mm. O altă problemă întâlnită în acest caz a fost ruperea foarte rapidă/ușoară a unor scule cu un diametru de 1mm datorită parametrilor de așchiere aleși.



Fig. 7.23. Pastila amovibilă din oțel

## 7.4 Fabricarea unei matrițe cu pastile amovibile.

Fabricarea sculelor și matrițelor pe mașini cu comandă numerică reprezintă ca și proiectarea piesei (CAD) operațiuni complementare sistemului de operare definit ca proces de transformare a pieselor din material plastic. Documentația primară rezultată din concepția piesei va fi utilizată pentru fabricarea automatizată asistată de calculator (CAM) pe mașini-unelte cu comandă numerică (NC) a cavităților active ale matriței. [Iclănzan, 2006]

În acest subcapitol, folosindu-se informațiile dobândite în urma realizării matriței prototip, s-a trecut la realizarea unei matrițe din oțel ce poate fi folosită pe mașina de injectat din dotarea Laboratorului de Plasturgie – al catedrei TCM. După ce s-au realizat mai multe pastille având rețele de distribuție și piese diferite, pentru realizarea unor teste pe mașina de injectat, este necesară realizarea unei matrițe ce permite schimbarea pastilelor. Matrița a fost realizată cu ajutorul echipamentelor: FUS22 sau pe microfresa MF70 iar pentru realizarea componentelor complicate ale matriței precum și pentru realizarea cuiburilor complexe s-a utilizat mașina de frezat ISEL GFM 4433, respectiv ISEL Premium 3020. [Isel]

Utilizând soft-ul Solidworks s-a realizat modelul virtual (Figura 7.24) complet al unei matrițe de injectat cu pastile amovibile, iar în urma desenelor 2D au fost executate elementele componente ale matriței. Modelul virtual permite determinarea problemelor ce pot apărea în timpul prelucrărilor mecanice și remedierea acestora.

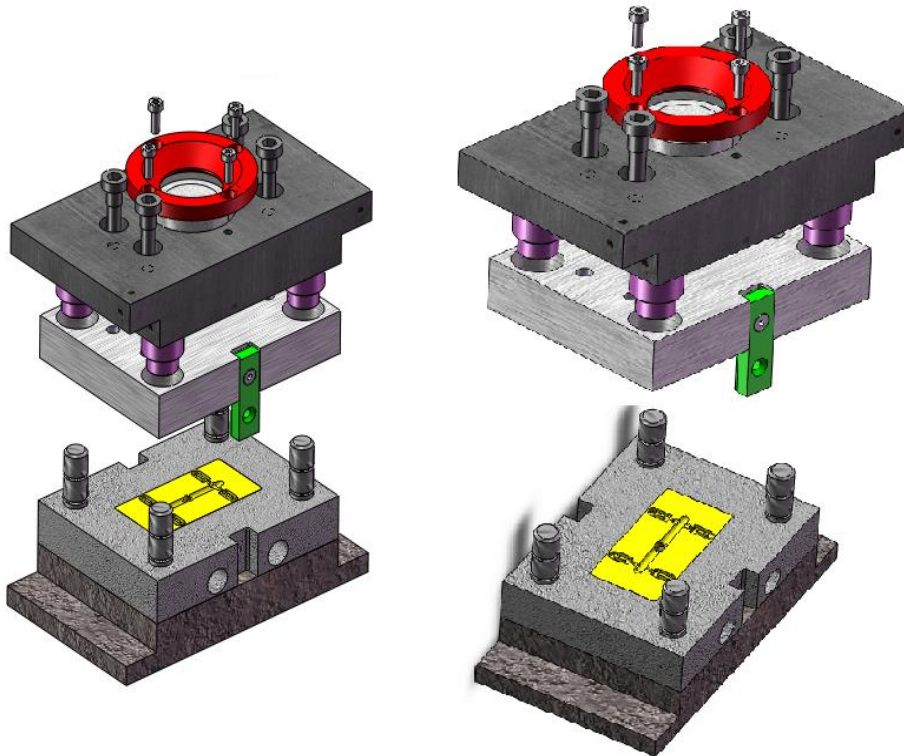


Fig.7.24. Reprezentarea grafică a matriței cu pastile amovibile

Elementele componente ale matriței au fost supuse la diferite operații de prelucrare prin așchiere: găurire, strunjire, frezare, alezare și rectificare. Semifabricatele din oțel au fost debitate și aduse la cotele finale pe mașina de frezat. Astfel cotele finale ale plăcilor sunt:

- Plăcile de prindere: 90x85x20mm
- Plăcile distanțiere: 90x17x17mm
- Placa de presiune: 90x60x10mm
- Placile port-pastilă/de formare: 90x60x20mm

În figura 7.25 este prezentată matrița de injectat și pastilele amovibile ce se potrivesc în locașul plăcii de formare cu ajutorul umerilor. De asemenea se observă că imaginile sunt reprezentative la nivel comparativ cu diverse obiecte.



Fig.7.25 Matrița de microinjectare și pastilele amovibile

## 7.5 Realizarea unei matrițe specifice industriei electronice – conectori

Acest subcapitol va prezenta pașii parcurși pentru realizarea unei matrițe de injectat conectori specifici industriei electronice. Modelul virtual, realizarea matriței și desfășurarea unor teste de injectare s-au realizat în cadrul firmei ESSER din Timișoara. Piesa supusă cercetărilor este un conector (Figura 7.26) și materialul din care se dorește a fi injectat este ABS, iar figura 7.27 prezintă desenul de execuție.

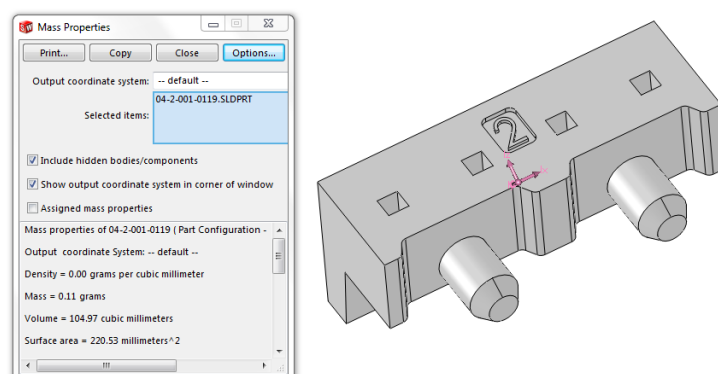


Fig.26. Reperul supus studiului

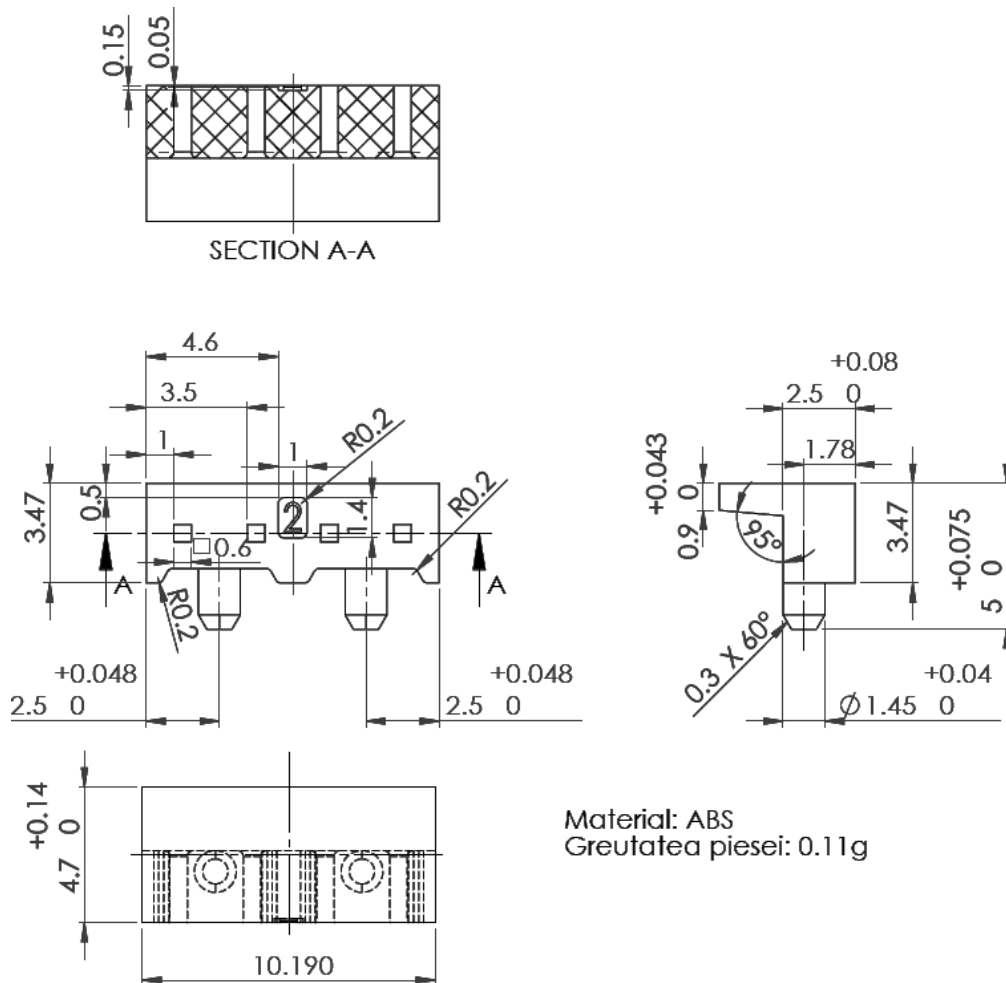


Fig. 7.27 Desenul de execuție

Folosind sisteme CAD/CAE s-a realizat un studiu amănunțit asupra piesei pentru a testa capacitatea acesteia de a fi injectată într-o matriță pentru microinjectare folosind rețele de distribuție ce au rezultat în urma cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze. Folosind soft-ul Moldflow s-a simulat umplerea unei matrițe cu 2, 4 și 8 cuiburi, iar în urma analizei rezultatelor s-a ales varianta corectă și cea mai eficientă de realizare a matriței. Cerințele sunt ca piesele să fie corect injectate (fără defecte de formă sau goluri de aer) și timpul de injectare să fie cât mai redus în raport cu numărul de cavități.

S-a început prin a simula curgerea materialului polimeric la o matriță cu două cuiburi folosind o rețea de distribuție cu canalul principal cu diametrul de 2,8mm, folosindu-se un dig de tip tunel înclinat cu diametrul punctului de injectare de 0.8mm. Studiind raportul simulării s-au extras rezultatele privind timpul de injectare (figura 7.28.d), probabilitatea de umplere (figura 7.28.b), temperatura frontului de curgere (figura 7.28.a) și presiunea ce se formează în cavități în timpul injectării (figura 7.28.c).

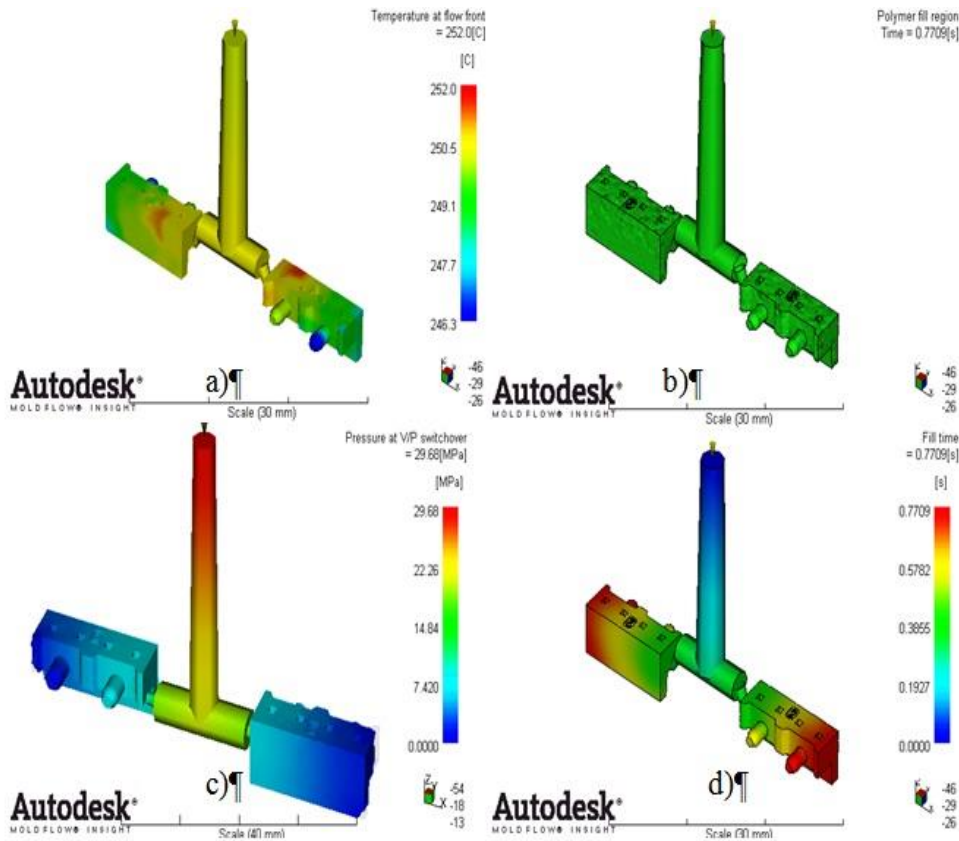


Fig. 7.28 Rezultatele simulării curgerii pentru 2 cavități  
 a – temperatura frontului de curgere, b – probabilitatea de umplere,  
 c – presiunea în timpul injectării, d – timpul de injectare

În continuare s-a simulat curgerea prin aceeași rețea de distribuție, dar pentru umplerea unei matrițe cu patru cavități. Studiind raportul simulării s-au extras diagramele cu timpul de injectare (figura 7.29.a), procentajul de umplere (figura 7.29.b), temperatura frontului de curgere (figura 7.29.c) și presiunea ce se formează în cavități în timpul injectării (figura 7.29.d).

Din cele două simulări se observă că timpul umplerii matriței cu două cavități este de 0,7709s ceea ce înseamnă că vom avea un timp  $\approx 0,38$  s/piesă, iar timpul umplerii matriței cu patru cuiburi este de 0,8692s însemnând un timp  $\approx 0,21$  s/piesă. Prin urmare cu cât numărul de cuiburi crește cu atât mai eficient este procesul de injectare. Datorită restricțiilor impuse de mașina de injectat nu se poate realiza o matriță cu mai mult de opt cuiburi urmând a se realiza o simulare pentru a vedea și ce efect va avea dublarea numărului de cuiburi asupra umplerii pieselor.

În acest sens a fost utilizată o rețea de injectare de tip H (Fig. 7.30) având un canal de distribuție principal cu un diametrul de 2,8mm și două canale de distribuție secundare dintre care primul cu diametru de 2,5mm, iar următorul cu 2mm. Digul folosit a fost unul de tip tunel înclinat cu diametrul punctului de injectare de 0,8mm.



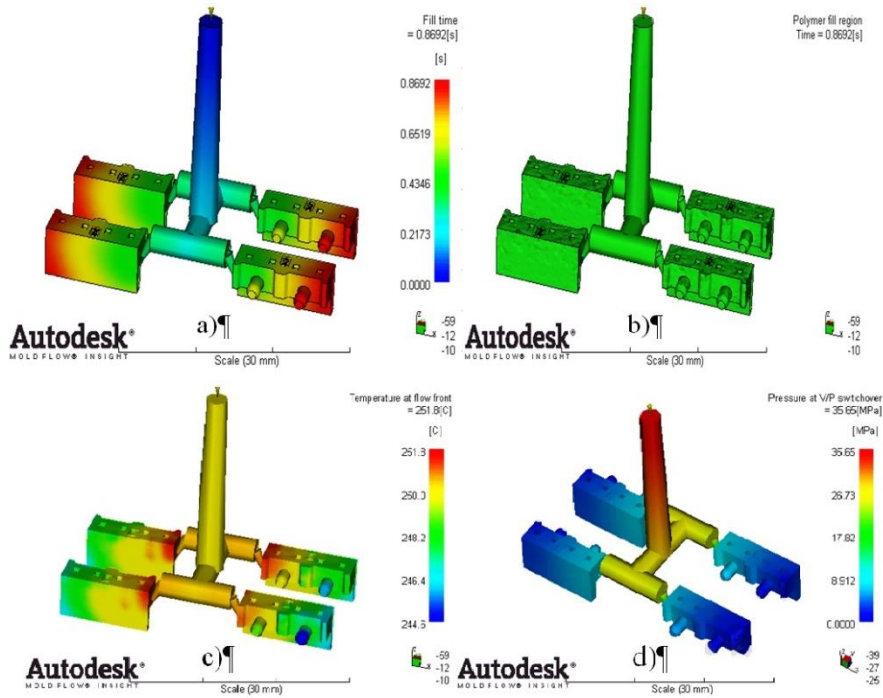


Fig. 7.29 Rezultatele simulării curgerii pentru 4 cavități  
 a – Timpul de injectare, b – probabilitatea de umplere,  
 c – temperatura frontului de curgere, d – presiunea în timpul injectării

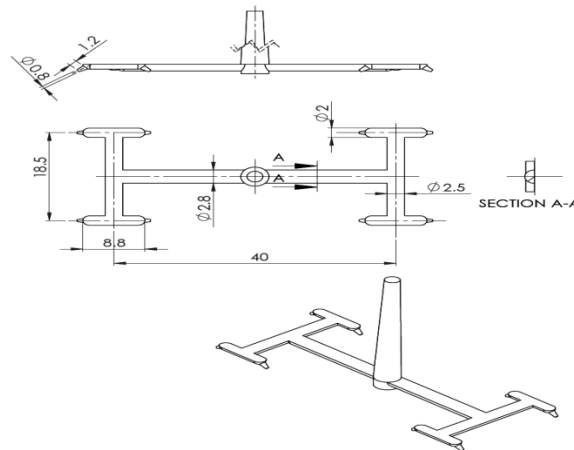


Fig. 7.30 Dimensionarea rețelei de distribuție pentru matrița cu 8 cuiburi

În urma simulării de umplere a cavităților și a studierii raportului s-au extras rezultatele privind timpul de injectare (Figura 7.31.a), probabilitatea de umplere (Figura 7.31.b), temperatura frontului de curgere (Figura 7.31.c) și presiunea ce se formează în cavități în timpul injectării (Figura 7.31.d). Timpul de umplere a celor opt cavități este 0,952sec.



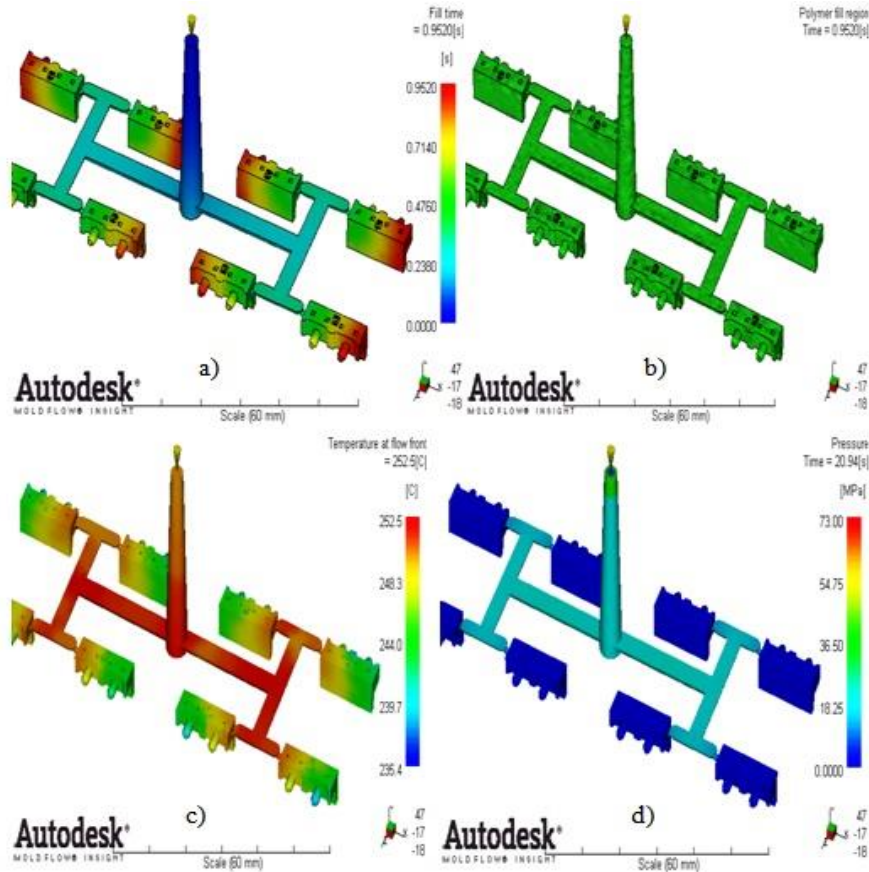


Fig. 7.31 Rezultatele simulării curgerii pentru 8 cavități  
 a – Timpul de injectare, b – probabilitatea de umplere,  
 c – temperatura frontului de curgere, d – presiunea în timpul injectării

În urma studiului realizat cu un program bazat pe metoda elementului finit s-a optat pentru realizarea unei matrițe cu opt cavități (Figura 7.32) urmând recomandările soft-ului de simulare Autodesk Moldflow. Datorită dimensiunilor reduse ce trebuie injectate cuiburile matriței au fost executate prin procedeul de electroeroziune cu electrod masiv, iar canalele de distribuție prin frezare. Folosindu-se un dig de tip tunel înclinat ce este dificil de realizat prin frezare și care suferă deteriorări în timp, s-a optat pentru realizarea unor pastile amovibile ce conțin canalele de distribuție secundare cu diametrul de 2mm și digul prin electroeroziune cu electrod masiv.

Figura 7.32 prezintă matrița cu opt cuiburi, pentru realizarea conectorilor din industria electronică, în diverse ipostaze. Prin comparația monedei cu piesa existentă în figură respectiv cavitățile matriței se poate face o aproximare a dimensiunilor miniaturale ale piesei. Astfel piesa respectivă se pretează procedurii de microinjectare datorită grosimii de perete, dimensiunilor mici și toleranțelor impuse.

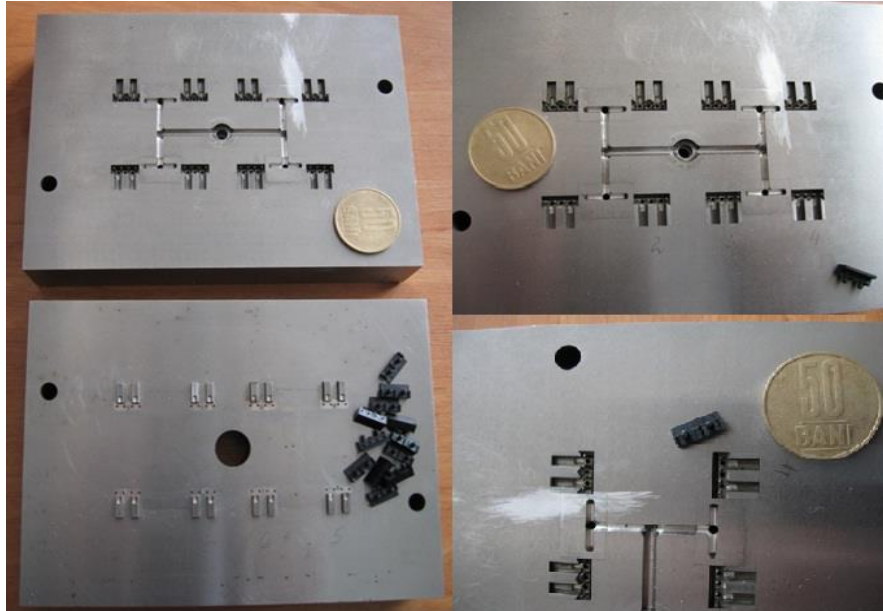


Fig.7.32 Matrița cu 8 cuiburi

## 7.6 Concluzii

În urma unor cercetări riguroase realizate asupra fenomenului de microinjectare și a diverselor scule utilizate în acest domeniu s-a hotărât realizarea unor tipuri de pastile și a unei matrițe specifice procedurii.

Cu ajutorul mașinilor unelte din existente în cadrul platformei experimentale în dotarea catedrei de TCM, cu ajutorul diverșilor colegi, a unor persoane din industrie și prin contribuțiile personale au fost concepute, realizate și finalizate, simulări și prelucrări cu aplicabilitate practică și industrială. Dacă la început a existat ideea realizării unei matrițe din material polimeric care să fie o bază de pornire în realizarea uneia ulterioare funcționale din oțel, acest fapt a devenit realitate după întărirea și consolidarea unor cunoștințe din domeniul microprelucrărilor. Realizarea pastilelor amovibile pentru microinjectare și deopotrivă a matriței specifice nu a reprezentat un lucru simplu de realizat datorită regimurilor de lucru total diferite ale frezelor miniaturale și sensibilității acestora în exploatare.

Consolidarea cunoștințelor în acest domeniu de mare interes a fost de bun augur și datorită colaborării cu firme din industrie (ESSER) care au avut ca rezultat execuția unor repere din industria electronică (conectori) pentru care a fost nevoie de realizarea unor simulări de umplere și alegerea unui număr optim de cuiburi pentru matriță în scopul unei productivități ridicate.

## Concluzii, contribuții originale și direcții viitoare de cercetare

Lucrarea se înscrie în temele de actualitate privind obținerea de piese injectate de dimensiuni miniaturale conform cu ceea ce se dorește la ora actuală pe piața produselor din materiale polimerice obținute prin procedeul de microinjectare. Lucrarea este tratată atât din considerente reologice cât și matematice în conformitate cu soft-ul utilizat. Datorită obiectivelor propuse dar mai ales datorită cunoștințelor minimale în acest domeniu al microinjectării a fost necesară o abordare a cercetării pe diverse etape:

- Realizarea unui studiu teoretic privind conceptul de reologie văzut din prisma curgerii materialelor polimerice și tipuri de modele matematice utilizate în cazul curgerii non-newtoniene.

- Realizarea unui studiu teoretic privind tehnica obținerii pieselor miniaturale prin procedeul de microinjectare

- O sinteză asupra procedurii de microinjectare (mașini utilizate în proces, scule specifice prelucrării de microcavități, materiale utilizate) și a caracteristicilor specifice acestuia (cerințe restrictive privind scula de microinjectare)

- O sinteză privind domeniile de aplicabilitate a pieselor miniaturale obținute prin procedeul de microinjectare

- Definierea unei platforme experimentale și operaționale care să asigure posibilitatea realizării studiului curgerii topiturii de polimer și fabricarea unei matrițe destinate microinjectării

- Cercetări experimentale cu ajutorul programului specific analizei cu element finit Autodesk MoldFlow

- ◆ Cercetări experimentale privind curgerea materialului polimeric prin rețele și cavități cu aplicabilitate la microinjectare

- ◆ Realizarea unui tabel specific rețelelor de injectat pentru microinjectare la diametre sub 3 mm prin implementarea unui algoritm de calcul (progresie aritmetică) ce vizează lungimea maximă de curgere prin rețea în cazul materialelor cu vâscozitate ridicată respectiv vâscozitate scăzută.

- ◆ Realizarea unui studiu amănunțit asupra curgerii materialelor polimerice prin rețelele amintite anterior.

- ◆ Evaluarea rezultatelor obținute în urma studiului curgerii privind materialele cu vâscozitate ridicată respectiv scăzută.

- ◆ Studiul curgerii materialului polimeric pe baza unor modele referențiale aparținând diverselor domenii.

- Fabricarea unei matrițe experimentale (prototip) din material polimeric specifice procesului de microinjectare, care să funcționeze cu pastile amovibile

- Realizarea unor elemente active amovibile (pastile amovibile) destinate procesului de microinjectare

- Fabricarea unei matrițe din oțel destinată microinjectării

- Aplicabilitatea studiului curgerii prin rețele în cazul microinjectării în domeniul uzinal la fabricarea unor piese de tip conectori.

Rezultatele studiilor teoretice respectiv a celor experimentale realizate în cadrul prezentei lucrări permit **stabilirea următoarelor contribuții** originale:

- 1.** Realizarea unui studiu teoretic privind tehnica obținerii pieselor prin microinjectare ce se axează pe cercetări care privesc mașinile, echipamentele, sculele și materialele care pot fi utilizate în vederea obținerii pieselor miniaturale.

**2. Sinteza asupra procedurii de microinjectare** și a caracteristicilor specifice acestuia vizează diferențele existente între injectarea convențională și procesul de microinjectare. Diferența se poate realiza din punct de vedere al mașinilor de injectat, a modului de realizare a matriței, al parametrilor de proces utilizați frecvent, al simulării respectiv al prețului de cost. Tot aici putem include studiul privind domeniile de aplicabilitate a reperelor obținute prin procedeul microinjectării.

**3. Definierea unei platforme experimentale destinate procedurii specific de microinjectare** ce include atât echipamente hardware cât și software (mașina de injectat KraussMaffei ERD 35B destinată obținerii de CD/DVD-uri, mașina de frezat cu viteze ridicate de prelucrare ISEL Premium.3020 (High Speed Machining), mașina de frezat ISEL GFM 4433, mașina de măsurat tridimensional TESA 3D, microfresa MF70, Autodesk MoldFlow, SolidWorks, Catia, Edge Cam)

**4. Cercetări experimentale privind curgerea materialului polimeric prin rețele și cavități cu aplicabilitate la microinjectare** care se axează pe o serie de simulări de curgere realizate în programul specific Autodesk MoldFlow ce au ca scop umplerea rețelelor pentru microinjectare utilizând materiale cu vâscozități diferite. Conform tabelului existent la injectarea convențională (cu roșu în Anexa 3.1) privind lungimea maximă a rețelei de injectat funcție de vâscozitatea de material se realizează un algoritm destinat dimensionării lungimilor de rețea pentru dimensiunile intermediare ale diametrelor din tabelul existent din 0.5 în 0.5mm (rezultatele în culoarea verde din Anexa 3.1). Urmând acest principiu se realizează *tabelul specific microinjectării* privind lungimea maximă de rețea de injectat în funcție de diametru rețelei (Anexa 5.1 dimensiuni <3mm) respectiv tipul de vâscozitate al materialului, utilizând o progresie aritmetică (cu rația de 3,33VS respectiv 1,66VR). Sunt realizate simulări de curgere pentru rețele de injectat cu toate dimensiunile existente utilizând patru materiale cu vâscozitate ridicată și șase cu vâscozitate scăzută urmărindu-se materialul cu fluiditatea cea mai bună. În urma rezultatelor pozitive obținute în cazul simulărilor realizate în MoldFlow se constată că rețelele se vor umple în proporție de 98% ceea ce duce la o validitate a algoritmului utilizat privind alegerea lungimii rețelei în funcție de diametrul canalului de de injectare.

De asemenea sunt realizate simulări de curgere pentru modelele referențiale realizate specifice industriei vestimentare, IT, mecanice și electronice.

**5. Fabricarea unei matrițe experimentale** din material polimeric specifice procesului de microinjectare care să funcționeze cu pastile amovibile este realizată cu ajutorul mașinii de frezat MF70 și reprezintă baza unei viitoare matrițe din oțel.

**6. Realizarea unor pastile amovibile din aluminiu și oțel** destinate procesului de microinjectare vizează fabricarea pastilelor pe mașinile de frezat ISEL existente în cadrul platformei experimentale.

**7. Fabricarea unei matrițe din oțel destinată microinjectării** se axează pe modul de prelucrare și uzinare a elementelor componente ale matriței pentru microinjectat.

**8. Efectuarea unor încercări în colaborare cu o firmă specializată din Timișoara** pentru realizarea unei matrițe pentru microinjectare (ESSER) prezintă aplicabilitatea studiului curgerii prin rețele în domeniul uzinal specifică realizării pieselor din industria electronică (conectori).

**Direcții viitoare de cercetare:**

- realizarea unui model de tabel asemănător pentru microinjectare, cu specificația că secțiunea rețelei este trapezoidală sau paraboloid;
- realizarea unor matrițe experimentale din oțel sau aluminiu cu ajutorul cărora să se realizeze piese miniaturale din diverse domenii;
- utilizarea altor soft-uri de simulare cu element finit (CAE) specific curgerii polimerilor și realizarea diverselor comparații privind rezultatele obținute.

**Tabel cu tipuri de vâscozitate al diverselor  
materiale polimerice.**  
[Sawhey, 2007],[Frenkler, 2001],[Goodship, 2004]

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

**Viteza frontului de curgere pentru o serie de materiale polimerice.**

<b>Nr. Crt.</b>	<b>Material</b>	<b>Viteza frontului de curgere [m/s]</b>
1	ABS	80-150
2	SAN	140
3	PMMA	100-150
4	PA6	270-340
5	PA6.6	180-350
6	PVC plastifiat	pana la 180
7	PVC neplastifiat	60
8	PBT	160-200
9	PC	Pana la 200
10	PET	Pana la 350
11	HDPE	150-200
12	LDPE	200-300
13	PPS	150
14	PS	150
15	PP	150-350



## Injectarea convențională

Diametrul rețelei $\Phi$ (mm)	Lungimea maximă a rețelei (mm)	
	Vâscozitate scăzută	Vâscozitate ridicată
3	100	50
3.5	116.65	58.5
4	133.3	67
4.5	149.95	75.5
5	166.6	84
5.5	183.25	92.5
6	200	100
6.5	213.3	108.5
7	226.6	117
7.5	239.9	125.5
8	253.2	134
8.5	266.5	142.5
9	280	150
9.5	286.25	153.2
10	292.5	156.4
10.5	298.75	159.6
11	305	162.8
11.5	311.25	166
12	317.5	169.2
12.5	323.75	172.4
13	330	175
13.5	336.25	178.9
14	342.5	182.8
14.5	348.75	186.7
15	355	190

## Mașini pentru microinjectat și caracteristicile acestora [Giboz, 2007]

Producător	Model	Forța de închidere [kN]	Capacitatea de injectare [cm <sup>3</sup> ]	Diametru melc sau piston	Viteza de injectare (mm s <sup>-1</sup> )
Lawton	Sesame Nanomolder	13.6	0.082	10mm piston	1200
APM	SM-5EJ	50	1	14mm melc	800
Battenfield	Microsystem 50	56	1.1	14mm melc	760
Nissei	AU-3	30	3.1	14mm melc	-
Babyplast	Babyplast 6/10	62.5	4	10mm piston	-
Sodic	TR05EH	49	4.5	14mm melc	300
Rondol	High Force 5	50	4.5	20mm melc	-
Boy	12/AM 129-11	129	4.5	12mm melc	-
Toshiba	EC5-01A	50	6	14mm melc	150
Fanuc	Roboshot S2000-I 5A	50	6	14mm melc	300
Sumimoto	SE7M	69	6.2	14mm melc	300
Milacron	Si-B17 A	147	6.2	14mm melc	-
MCP	12/90 HSE	90	7	16mm melc	100
Nissei	EP5 Real Mini	49	8	16mm melc	250
Toshiba	NP7	69	10	16mm melc	180

### **Forța de închidere pentru diverse mașini de injectat [Rosato, 2000]**

<b>Producător</b>	<b>Țara de origine</b>	<b>Forța de închidere hidraulică [tone]</b>	<b>Forța de închidere la mașini verticale [tone]</b>
Arburg	Germania	17-220	17-83
Battenfield	USA, Austria Germania	10-110	22-300
Boston Matthews	Anglia	10-50	10-22
Boy Machines	Germania	24-88	24
Ferromatik	Germania	20-400	50-400
Gluco	USA	40	5-200
GoldStar Cable	Coreea	30-950	
HPM	SUA	35-4000	125
Hull	SUA	6-250	25-700
Jaco	SUA	50-75	40-80
Kawaguchi	Japonia	50-650	
Kurto/John	Germania	25-35	
Main Group	Italia		40-250
Meiki	Japonia	40-3300	500-1800
Negri Bossi	Italia	40-1120	
Newbury	USA	35-700	30-200
Niigata	Japonia	35-500	50-150
Nissei	Japonia	11-1500	33-5000
Presses KAP	Franta		10,30,40,60
Sadaplast	Elvetia		30-50
Sumitomo	Japonia	8-82	27-82
Techmire	Canada	45	45
TMC	Taiwan	7-80	
Toyo	Japonia	20-500	
Truematic	USA		15-250

## Mașini specializate pentru microinjectare și caracteristicile acestora conform bazei de date MoldFlow 2010

Denumire mașină	Producător	Cursa maximă a melcului [mm]	Viteza de injectare maximă [cm <sup>3</sup> /s]	Diam. melcului [mm]	Forța de închidere [tone]
<b>VS33-22 (20.5g)</b>	<b>Cincinnati Milacron</b>	<b>85</b>	<b>34.06</b>	<b>18</b>	<b>30</b>
<b>50tone</b>	<b>General</b>	<b>120</b>	<b>45.6</b>	<b>32</b>	<b>50</b>
<b>Allrounder 220S (0.5oz)</b>	<b>Arburg</b>	<b>47.01</b>	<b>21.99</b>	<b>15</b>	<b>17</b>
Allrounder 220S (1.3oz)	Arburg	55.58	32	18	17
Allrounder 220S (1.3oz)	Arburg	55.58	50.02	18	28
Allrounder 270S (1.3oz)	Arburg	55.58	32	18	17
Allrounder 270S (1.3oz)	Arburg	55.58	50.02	18	28
Allrounder 270S (1.3oz)	Arburg	55.58	50.02	18	38
Allrounder 270S (1.3oz)	Arburg	55.58	50.02	18	55
Allrounder 320S (1.3oz)	Arburg	55.58	50.02	18	38
Allrounder 320S (1.3oz)	Arburg	55.58	50.02	18	55
Allrounder 270C (2.3oz)	Arburg	77.49	56.12	20	33
Allrounder 270C (2.3oz)	Arburg	77.49	56.12	20	44
Allrounder 320C (2.3oz)	Arburg	77.49	80.08	20	55
Allrounder 221K (2.3oz)	Arburg	77.49	33.97	20	28
Allrounder 221K (2.3oz)	Arburg	77.49	33.97	20	38
Allrounder 900T (1.3oz)	Arburg	55.58	53.99	18	44
Allrounder 1200T 1.3oz	Arburg	55.58	53.99	18	44
Roboshot 17i 0.37oz	Milacron	56	40	16	17
Roboshot 17i 0.47oz	Milacron	56	51	18	17
Roboshot 33i 0.37oz	Milacron	56	40	16	33
Roboshot 33i 0.37oz	Milacron/ HSP-pres	56	66.4	16	33
Roboshot 33i 0.63oz	Milacron	75	51	18	33
Roboshot 33i 0.63oz	Milacron/ HSP-pres	75	84	18	33
Roboshot 33i 0.78oz	Milacron	75	63	20	33

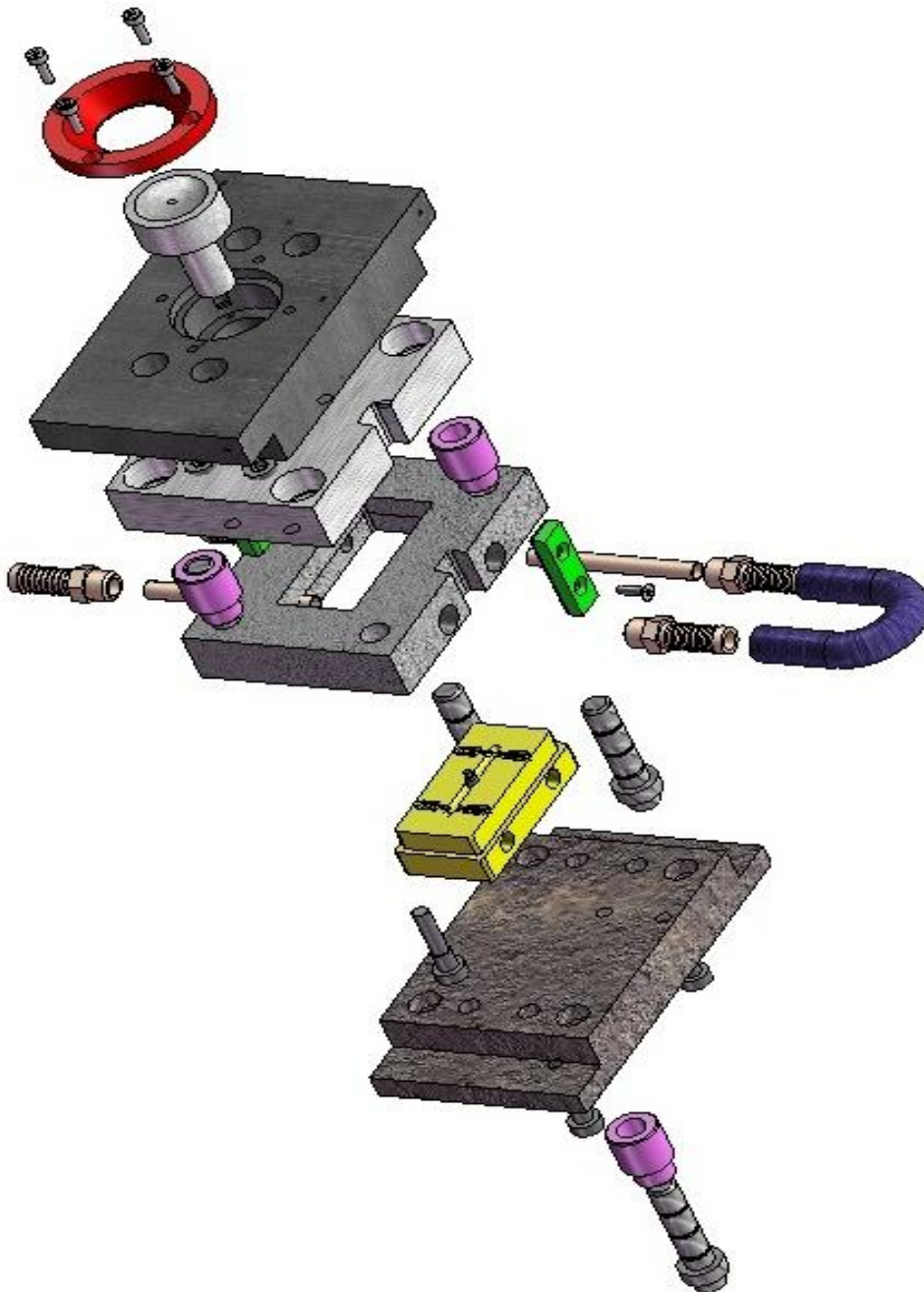
<b>Roboshot 33i 0.78oz</b>	<b>Milacron/ HSP-pres</b>	<b>75</b>	<b>103.7</b>	<b>20</b>	<b>33</b>
<b>Roboshot 55i 0.78oz</b>	<b>Milacron</b>	<b>75</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>55</b>
<b>Roboshot 55i 0.78oz</b>	<b>Milacron/ HSP-pres</b>	<b>75</b>	<b>66.4</b>	<b>20</b>	<b>55</b>
<b>Roboshot 55EV 0.78oz</b>	<b>Milacron</b>	<b>75</b>	<b>56.5</b>	<b>20</b>	<b>55</b>
<b>NN 35 1.31oz</b>	<b>Niigata</b>	<b>85.09</b>	<b>98.13</b>	<b>25</b>	<b>33</b>
<b>MD 35SIII 0.68oz</b>	<b>Niigata</b>	<b>85.09</b>	<b>38.24</b>	<b>18</b>	<b>35</b>
<b>MD 55SIII 0.68oz</b>	<b>Niigata</b>	<b>85.34</b>	<b>38.24</b>	<b>18</b>	<b>55</b>
<b>LGH25N</b>	<b>LG Cable Co Ltd</b>	<b>112</b>	<b>52</b>	<b>25</b>	<b>25</b>
<b>LGE 30</b>	<b>LG Cable Co Ltd</b>	<b>76</b>	<b>94</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
<b>LGE50</b>	<b>LG Cable Co Ltd</b>	<b>110</b>	<b>147</b>	<b>25</b>	<b>50</b>
<b>Cadence 28-35 0.8oz</b>	<b>Van Dorn Demag</b>	<b>90</b>	<b>88</b>	<b>18</b>	<b>28</b>
<b>Cadence 28-35 0.5oz</b>	<b>Van Dorn Demag</b>	<b>90</b>	<b>53</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>Cadence 28-80 0.8oz</b>	<b>Van Dorn Demag</b>	<b>90</b>	<b>64</b>	<b>18</b>	<b>28</b>
<b>Cadence 40-80 0.8oz</b>	<b>Van Dorn Demag</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>18</b>	<b>39</b>
<b>Newbury 1.7oz</b>	<b>Van Dorn Demag</b>	<b>102</b>	<b>61</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
<b>60F</b>	<b>Welltec Machinery Limited</b>	<b>135</b>	<b>61</b>	<b>25</b>	<b>60</b>

**Notă:** Mașina pentru microinjectare de la Arburg-Allrounder 220S (0.5oz) evidențiată în culoare unică în comparație cu celelalte mașini de injectat prezentate este tipul utilizat la realizarea tuturor simulărilor de curgere din cadrul prezentei teze.

<b>Microinjectarea</b>		
<b>Diametrul rețelei</b>	<b>Lungimea maximă a rețelei (mm)</b>	
<b><math>\Phi</math> (mm)</b>	<b>Vâscozitate scăzută [Pa s]</b>	<b>Vâscozitate ridicată [Pa s]</b>
3	100	50
2.9	96.67	48.34
2.8	93.34	46.68
2.7	90.01	45.02
2.6	86.68	43.36
2.5	83.35	41.7
2.4	80.02	40.04
2.3	76.69	38.38
2.2	73.36	36.72
2.1	70.03	35.06
2	66.7	33.4
1.9	63.37	31.74
1.8	60.04	30.08
1.7	56.71	28.42
1.6	53.38	26.76
1.5	50.05	25.1
1.4	45	22.5
1.3	40	20
1.2	35	17.5
1.1	30	15
1	25	12.5
0.9	21.6	10.8
0.8	18.2	9.1
0.7	14.8	7.4
0.6	11.4	5.7
0.5	8	4
0.4	6	3.2
0.3	4	2.6
0.2	2	1.3
0.1	1	0.55



## Vedere explodată a ansamblului matriței proiectate pentru microinjectare



## Materiale polimerice utilizate în simulările realizate în mediul Moldflow și caracteristici de procesare ale acestora.

Denumire material	Producător	Uzual	Temp material [°C]	Temp matriță [°C]	Temp tranziție [°C]	Tmax topitură [°C]
Terblend N-NM-11 (ABS/PA6)	BASF	ABS	240-280	40-80	176	280
Teluran HH-112	BASF	ABS	230-270	30-60	115	310
Terlux 2802TR (MABS)	BASF	ABS	230-260	50-80	107	280
Urtal A12	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	ABS	220-260	40-80	130	280
<b>ABS 330**</b>	Techno Polymer	ABS	200-260	30-70	103	270
E 7301	Techno Polymer	ABS	220-280	40-80	115	285
Techno ABS 110	Techno Polymer	ABS	200-240	30-70	100	280
Techno MUH E7301	Techno Polymer	ABS	220-280	40-80	115	290
Luran 358 N	BASF	SAN	200-250	40-80	109	260
Sanrex SAN-C	Techno Polymer	SAN	180-260	30-80	100	270
Polystyrol 2710	BASF	HIPS	180-260	10~60	95	280
Ultramid 8202	BASF	PA6	230-300	70-110	188	340
<b>Minlon 73M40 NC010**</b>	Du Pont Europe	PA6	260-280	70-100	184	290
Zytel 101 NC010	Du Pont Europe	PA6.6	280-300	40-95	212	310
Kelon BH CET/30	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6	240-270	70-90	220	310
Latamid 6 H2G/20 V2HF	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6	230-250	70-90	220	290
Latamid 66 H2G/25	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6.6	255-292	70-90	245	300
Techno ASA AX23	Techno Polymer	PA6	180-260	40-70	100	270
<b>Ultradur B 2550**</b>	BASF	PBT	245-270	40-70	192	280
Crastin 6129 NC010	Du Pont Europe	PBT	240-260	30-130	185.5	270
Later 4G/30	Lati Industria Termoplastici SPA	PBT	240-260	80-100	195	300
Pibiter NRV 20	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PBT	235-260	40-80	220	280
<b>Excelloy CK 12*</b>	Techno Polymer	PC/ABS	230-280	30-80	115	300
<b>Petra 130**</b>	BASF	PET	280-300	100-110	214	320

Rynite 555 NC010	Du Pont Europe	PET	280-300	95-125	210	300
<b>Vespel CF 30NC*</b>	Du Pont Europe	PMMA	410-430	140-160	250	440
Vedril 7	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PMMA	220-260	50-90	130	280
Ultraform H4320	BASF	POM	190-220	60-100	145	220
<b>Delrin 100 NC010**</b>	Du Pont Europe	POM	210-220	80-100	145	230
Hifax CA 53A	Basel Polyolefins Europe	TPO	195-215	20-40	85	260
Adstif HA 740N	Basel Polyolefins Europe	PP	220-280	20-60	130	280
Hostacom BB 73F	Basel Polyolefins Europe	PP	220-260	20-60	160	300
Hostalen PPH 1850	Basel Polyolefins Europe	PP	240-270	30-50	133	320
Metocene HM 648P	Basel Polyolefins Europe	PP	220-260	20-40	119	280
Moplen 2000 HE XP	Basel Polyolefins Europe	PP	216-238	27-49	122	280
Moplen EP 340M	Basel Polyolefins Europe	PP	220-280	20-60	130	280
Latene 7TR-V2	Lati Industria Termoplastici SPA	PP	180-210	20-40	146	220
Moplen C30G	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PP	240-280	20-60	160	300
Astryn EPF 30U	Montell Europe	PP	190-290	21-60	125	330
EPL 31UA	Montell Europe	PP	190-290	21-60	135	330
H 32 GA	Montell Europe	PP	190-288	21-60	135	328
Hifax BA 238G	Montell Europe	PP	180-290	60-90	122	330
Higlass BJ 49E	Montell Europe	PP	215-240	25-50	135	280
Moplen F30 T4	Montell Europe	PP	190-270	21-60	130	310
Niplene F 30HF	Soledi Italy	PP	200-280	20-80	130	320
<b>Ultrason S2010*</b>	BASF	PSU	330-380	120-160	188	380
Styroblend PC 2065	BASF	PS	180-260	10~60	99	280
Edistir FA20100	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PS	180-220	20-70	100	240
Lupolen 1800H	Basel Polyolefins Europe	LDPE	205-245	20-60	90	265
Riblene MR10	Polimeri Europa	LLDPE	148-232	20-37	112	272
Flexirene MR50	Polimeri Europa	LLDPE	148-232	20-37	126	272
Purell GD 6250	Basel Polyolefins Europe	HDPE	200-280	10~90	115	320
Eraclene MM74	Polimeri Europa	HDPE	180-280	20-60	115	320
Eraclene MR80	Polimeri Europa	HDPE	220-260	20-60	115	300
<b>Keyflex BT</b>	Du Pont Europe	PE	235-260	20-50	150	270

## 230 Anexa 6.1

---

<b>1163D BK**</b>						
Vectra S475	Polyplastics	LCP	355-370	80-120	343	400
Vectra B230	Ticona	LCP	290-300	30-95	261.3	320
Zenite 5130L BK010	Du Pont Europe	LCP	325-345	40-95	288	355
Styrolux 3G 33	BASF	SBC	180-250	30-50	87	250
<b>Hytrel 3078*</b>	Du Pont Europe	TPC-ET	200-220	30-41	74	230
Thermix CG033 BK 10T	Du Pont Europe	PCT	295-310	80-120	258.5	320
Thermix CG907	Du Pont Europe	PCT	280-320	80-120	220	340
Thermix CG933	Du Pont Europe	PCT	290-310	80-120	248	320

\* materiale cu vâscozitate ridicată utilizate la simularea rețelelor specifice microinjectării  
\*\* materiale cu vâscozitate scăzută utilizate la simularea rețelelor specifice microinjectării

## Materiale polimerice utilizate în simulările realizate în mediul Moldflow și caracteristici de procesare ale acestora.

Denumire material	Producător	Uzual	Temp material [°C]	Temp matriță [°C]	Temp evacuare [°C]	Temp tranziție [°C]	Tmax topitură [°C]
Terblend N-NM-11(ABS/PA6)	BASF	ABS	240-280	40-80	90	176	280
Teluran HH-112	BASF	ABS	230-270	30-60	105	115	310
Terlux 2802TR (MABS)	BASF	ABS	230-260	50-80	90	107	280
Urtal A12	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	ABS	220-260	40-80	120	130	280
ABS 330	Techno Polymer	ABS	200-260	30-70	95	103	270
E 7301	Techno Polymer	ABS	220-280	40-80	90	115	285
Techno ABS 110	Techno Polymer	ABS	200-240	30-70	87	100	280
Techno MUH E7301	Techno Polymer	ABS	220-280	40-80	90	115	290
Luran 358 N	BASF	SAN	200-250	40-80	98	109	260
Sanrex SAN-C	Techno Polymer	SAN	180-260	30-80	90	100	270
Polystyrol 2710	BASF	HIPS	180-260	10≈60	85	95	280
Ultramid 8202	BASF	PA6	230-300	70-110	133	188	340
Minlon 73M40 NC010	Du Pont Europe	PA6	260-280	70-100	155	184	290
Zytel 101 NC010	Du Pont Europe	PA6.6	280-300	40-95	190	212	310
Kelon BH CET/30	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6	240-270	70-90	207	220	310
Latamid 6 H2G/20 V2HF	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6	230-250	70-90	207	220	290
Latamid 66 H2G/25	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6.6	255-292	70-90	230	245	300
Techno ASA AX23	Techno Polymer	PA6	180-260	40-70	90	100	270
Ultradur B 2550	BASF	PBT	245-270	40-70	160	192	280
Crastin 6129 NC010	Du Pont Europe	PBT	240-260	30-130	149	185.5	270
Later 4G/30	Lati Industria Termoplastici SPA	PBT	240-260	80-100	185	195	300
Pibiter NRV 20	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PBT	235-260	40-80	190	220	280
Excelloy CK 12	Techno Polymer	PC/ABS	230-280	30-80	100	115	300

Petra 130	BASF	PET	280-300	100-110	199	214	320
Rynite 555 NC010	Du Pont Europe	PET	280-300	95-125	180	210	300
Vespel CF 30NC	Du Pont Europe	PMMA	410-430	140-160	220	250	440
Vedril 7	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PMMA	220-260	50-90	120	130	280
Ultraform H4320	BASF	POM	190-220	60-100	110	145	220
Delrin 100 NC010	Du Pont Europe	POM	210-220	80-100	123	145	230
Hifax CA 53A	Basel Polyolefins Europe	TPO	195-215	20-40	81	85	260
Adstif HA 740N	Basel Polyolefins Europe	PP	220-280	20-60	70	130	280
Hostacom BB 73F	Basel Polyolefins Europe	PP	220-260	20-60	130	160	300
Hostalen PPH 1850	Basel Polyolefins Europe	PP	240-270	30-50	95	133	320
Metocene HM 648P	Basel Polyolefins Europe	PP	220-260	20-40	75	119	280
Moplen 2000 HE XP	Basel Polyolefins Europe	PP	216-238	27-49	113	122	280
Moplen EP 340M	Basel Polyolefins Europe	PP	220-280	20-60	65	130	280
Latene 7TR-V2	Lati Industria Termoplastici SPA	PP	180-210	20-40	112	146	220
Moplen C30G	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PP	240-280	20-60	120	160	300
Astryn EPF 30U	Montell Europe	PP	190-290	21-60	110	125	330
EPL 31UA	Montell Europe	PP	190-290	21-60	120	135	330
H 32 GA	Montell Europe	PP	190-288	21-60	90	135	328
Hifax BA 238G	Montell Europe	PP	180-290	60-90	110	122	330
Higlass BJ 49E	Montell Europe	PP	215-240	25-50	90	135	280
Moplen F30 T4	Montell Europe	PP	190-270	21-60	90	130	310
Niplene F 30HF	Soledi Italy	PP	200-280	20-80	93	130	320
Ultrason S2010	BASF	PSU	330-380	120-160	165	188	380
Styrolend PC 2065	BASF	PS	180-260	10≈60	89	99	280
Edistir FA20100	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PS	180-220	20-70	80	100	240
Lupolen 1800H	Basel Polyolefins Europe	LDPE	205-245	20-60	89	90	265
Riblene MR10	Polimeri Europa	LLDPE	148-232	20-37	65	112	272
Flexirene MR50	Polimeri Europa	LLDPE	148-232	20-37	65	126	272
Purell GD 6250	Basel Polyolefins Europe	HDPE	200-280	10≈90	103	115	320



---

Eraclene MM74	Polimeri Europa	HDPE	180-280	20-60	100	115	320
ERaclene MR80	Polimeri Europa	HDPE	220-260	20-60	100	115	300
Keyflex BT1163D BK	Du Pont Europe	PE	235-260	20-50	130	150	270
Vectra S475	Polyplastics	LCP	355-370	80-120	333	343	400
Vectra B230	Ticona	LCP	290-300	30-95	223	261.3	320
Zenite 5130L BK010	Du Pont Europe	LCP	325-345	40-95	267	288	355
Styrolux 3G 33	BASF	SBC	180-250	30-50	77	87	250
Hytrel 3078	Du Pont Europe	TPC-ET	200-220	30-41	60	74	230
Thermix CG033 BK 10T	Du Pont Europe	PCT	295-310	80-120	220	258.5	320
Thermix CG907	Du Pont Europe	PCT	280-320	80-120	210	220	340
Thermix CG933	Du Pont Europe	PCT	290-310	80-120	233	248	320

## Materiale polimerice utilizate în simulările realizate în mediul Moldflow și caracteristici de procesare ale acestora.

Denumire material	Producător	Uzual	Temp material [°C]	Temp matriță [°C]	Temp tranziție [°C]	Tmax topitură [°C]
Terblend N-NM-11 (ABS/PA6)	BASF	ABS	240-280	40-80	176	280
Teluran HH-112	BASF	ABS	230-270	30-60	115	310
Terlux 2802TR (MABS)	BASF	ABS	230-260	50-80	107	280
Urtal A12	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	ABS	220-260	40-80	130	280
<b>ABS 330**</b>	Techno Polymer	ABS	200-260	30-70	103	270
E 7301	Techno Polymer	ABS	220-280	40-80	115	285
Techno ABS 110	Techno Polymer	ABS	200-240	30-70	100	280
Techno MUH E7301	Techno Polymer	ABS	220-280	40-80	115	290
Luran 358 N	BASF	SAN	200-250	40-80	109	260
Sanrex SAN-C	Techno Polymer	SAN	180-260	30-80	100	270
Polystyrol 2710	BASF	HIPS	180-260	10~60	95	280
Ultramid 8202	BASF	PA6	230-300	70-110	188	340
<b>Minlon 73M40 NC010**</b>	Du Pont Europe	PA6	260-280	70-100	184	290
Zytel 101 NC010	Du Pont Europe	PA6.6	280-300	40-95	212	310
Kelon BH CET/30	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6	240-270	70-90	220	310
Latamid 6 H2G/20 V2HF	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6	230-250	70-90	220	290
Latamid 66 H2G/25	Lati Industria Termoplastici SPA	PA6.6	255-292	70-90	245	300
Techno ASA AX23	Techno Polymer	PA6	180-260	40-70	100	270
<b>Ultradur B 2550**</b>	BASF	PBT	245-270	40-70	192	280
Crastin 6129 NC010	Du Pont Europe	PBT	240-260	30-130	185.5	270
Later 4G/30	Lati Industria Termoplastici SPA	PBT	240-260	80-100	195	300
Pibiter NRV 20	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PBT	235-260	40-80	220	280
<b>Excelloy CK 12*</b>	Techno Polymer	PC/ABS	230-280	30-80	115	300
<b>Petra 130**</b>	BASF	PET	280-300	100-110	214	320

Rynite 555 NC010	Du Pont Europe	PET	280-300	95-125	210	300
<b>Vespel CF 30NC*</b>	Du Pont Europe	PMMA	410-430	140-160	250	440
Vedril 7	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PMMA	220-260	50-90	130	280
Ultraform H4320	BASF	POM	190-220	60-100	145	220
<b>Delrin 100 NC010**</b>	Du Pont Europe	POM	210-220	80-100	145	230
Hifax CA 53A	Basel Polyolefins Europe	TPO	195-215	20-40	85	260
Adstif HA 740N	Basel Polyolefins Europe	PP	220-280	20-60	130	280
Hostacom BB 73F	Basel Polyolefins Europe	PP	220-260	20-60	160	300
Hostalen PPH 1850	Basel Polyolefins Europe	PP	240-270	30-50	133	320
Metocene HM 648P	Basel Polyolefins Europe	PP	220-260	20-40	119	280
Moplen 2000 HE XP	Basel Polyolefins Europe	PP	216-238	27-49	122	280
Moplen EP 340M	Basel Polyolefins Europe	PP	220-280	20-60	130	280
Latene 7TR-V2	Lati Industria Termoplastici SPA	PP	180-210	20-40	146	220
Moplen C30G	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PP	240-280	20-60	160	300
Astryn EPF 30U	Montell Europe	PP	190-290	21-60	125	330
EPL 31UA	Montell Europe	PP	190-290	21-60	135	330
H 32 GA	Montell Europe	PP	190-288	21-60	135	328
Hifax BA 238G	Montell Europe	PP	180-290	60-90	122	330
Higlass BJ 49E	Montell Europe	PP	215-240	25-50	135	280
Moplen F30 T4	Montell Europe	PP	190-270	21-60	130	310
Niplene F 30HF	Soledi Italy	PP	200-280	20-80	130	320
<b>Ultrason S2010*</b>	BASF	PSU	330-380	120-160	188	380
Styroblend PC 2065	BASF	PS	180-260	10~60	99	280
Edistir FA20100	Montedison (Montepolimeri & Vedril)	PS	180-220	20-70	100	240
Lupolen 1800H	Basel Polyolefins Europe	LDPE	205-245	20-60	90	265
Riblene MR10	Polimeri Europa	LLDPE	148-232	20-37	112	272
Flexirene MR50	Polimeri Europa	LLDPE	148-232	20-37	126	272
Purell GD 6250	Basel Polyolefins Europe	HDPE	200-280	10~90	115	320
Eraclene MM74	Polimeri Europa	HDPE	180-280	20-60	115	320
Eraclene MR80	Polimeri Europa	HDPE	220-260	20-60	115	300
<b>Keyflex BT</b>	Du Pont Europe	PE	235-260	20-50	150	270

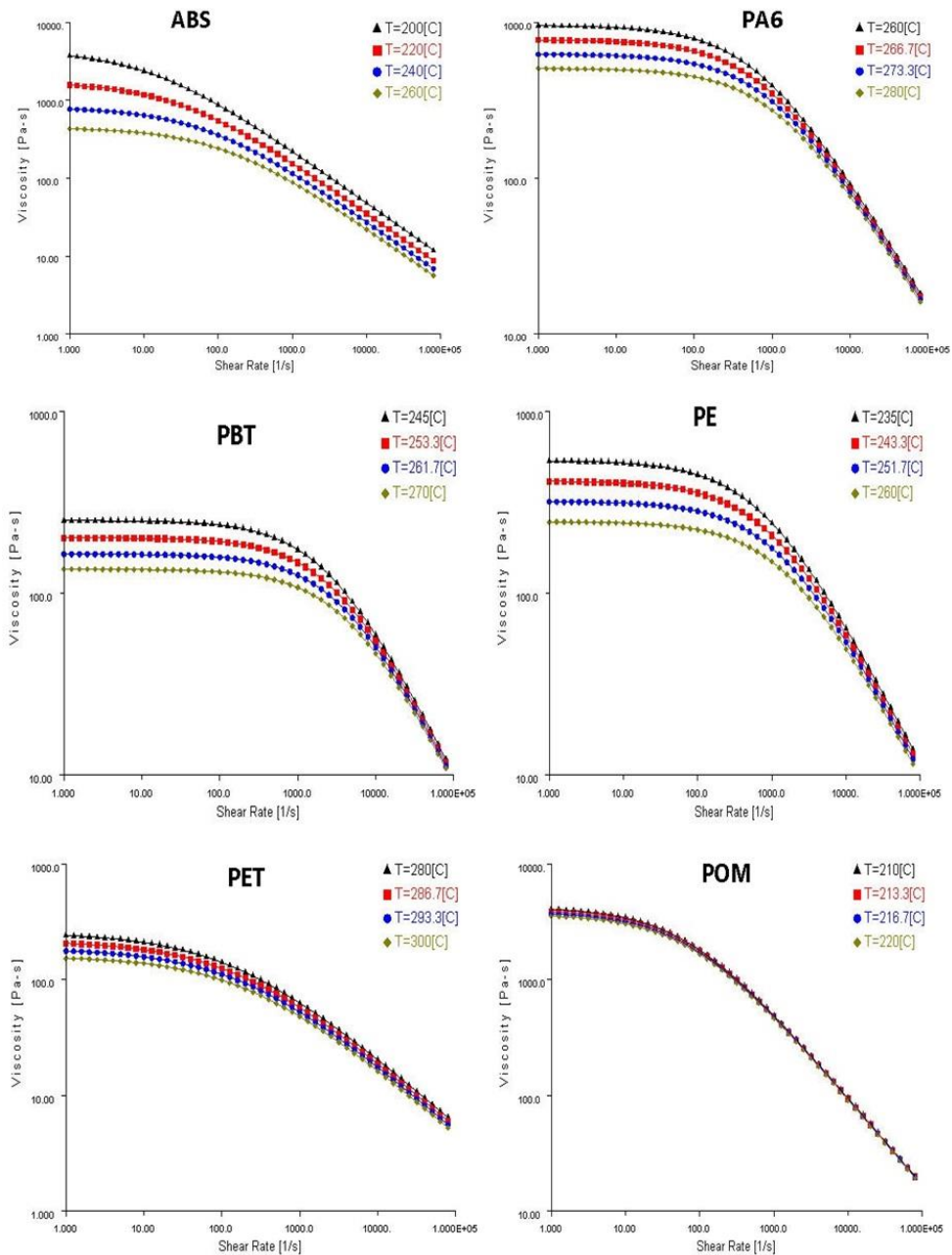
## 230 Anexa 6.1

---

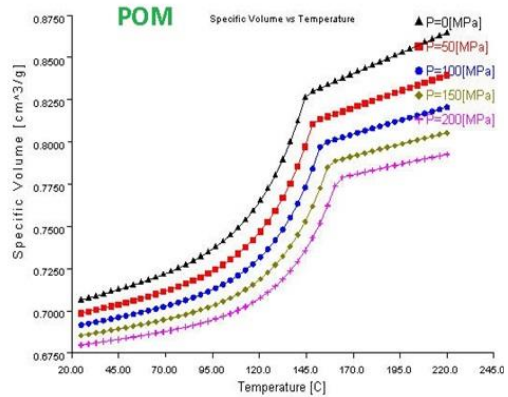
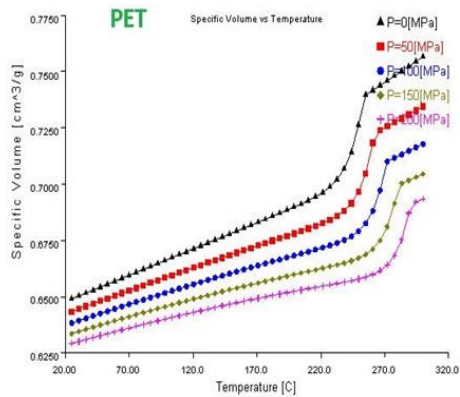
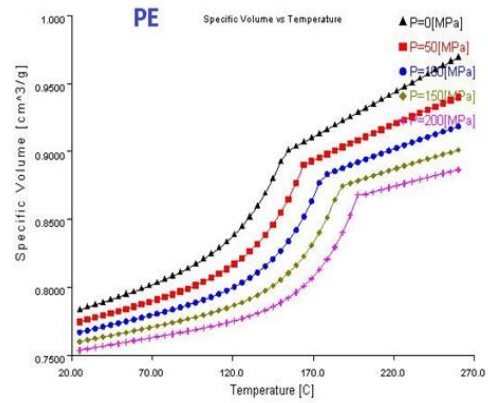
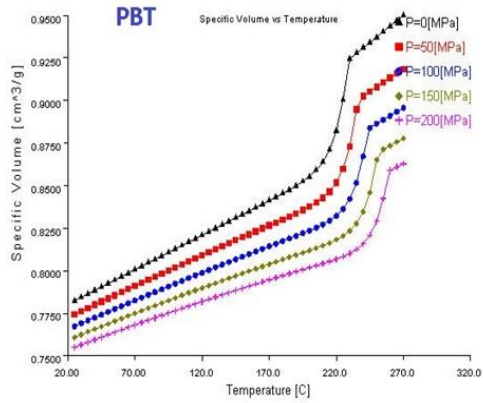
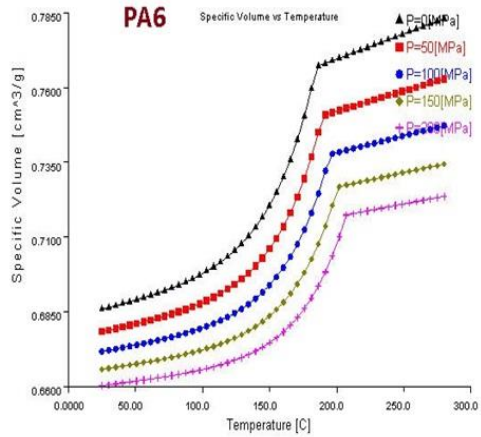
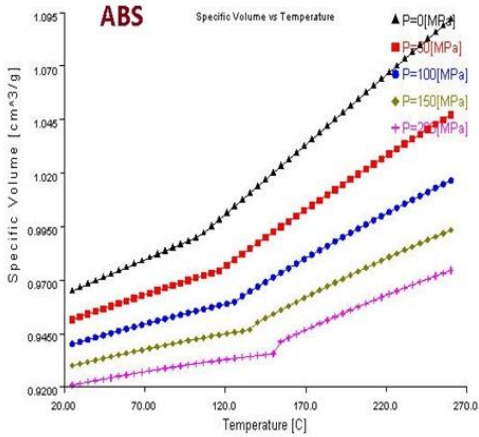
<b>1163D BK**</b>						
Vectra S475	Polyplastics	LCP	355-370	80-120	343	400
Vectra B230	Ticona	LCP	290-300	30-95	261.3	320
Zenite 5130L BK010	Du Pont Europe	LCP	325-345	40-95	288	355
Styrolux 3G 33	BASF	SBC	180-250	30-50	87	250
<b>Hytrel 3078*</b>	Du Pont Europe	TPC-ET	200-220	30-41	74	230
Thermix CG033 BK 10T	Du Pont Europe	PCT	295-310	80-120	258.5	320
Thermix CG907	Du Pont Europe	PCT	280-320	80-120	220	340
Thermix CG933	Du Pont Europe	PCT	290-310	80-120	248	320

\* materiale cu vâscozitate ridicată utilizate la simularea rețelelor specifice microinjectării  
\*\* materiale cu vâscozitate scăzută utilizate la simularea rețelelor specifice microinjectării

## Proprietăți reologice ale materialelor cu vâscozitate scăzută



## Diagrama PVT pentru materialele cu vâscozitate scăzută





**Rezultatele obținute în urma simulărilor de  
curgere specifice rețelelor de injectat pentru  
microinjectare în cazul materialelor polimerice  
cu vâscozitate scăzută**

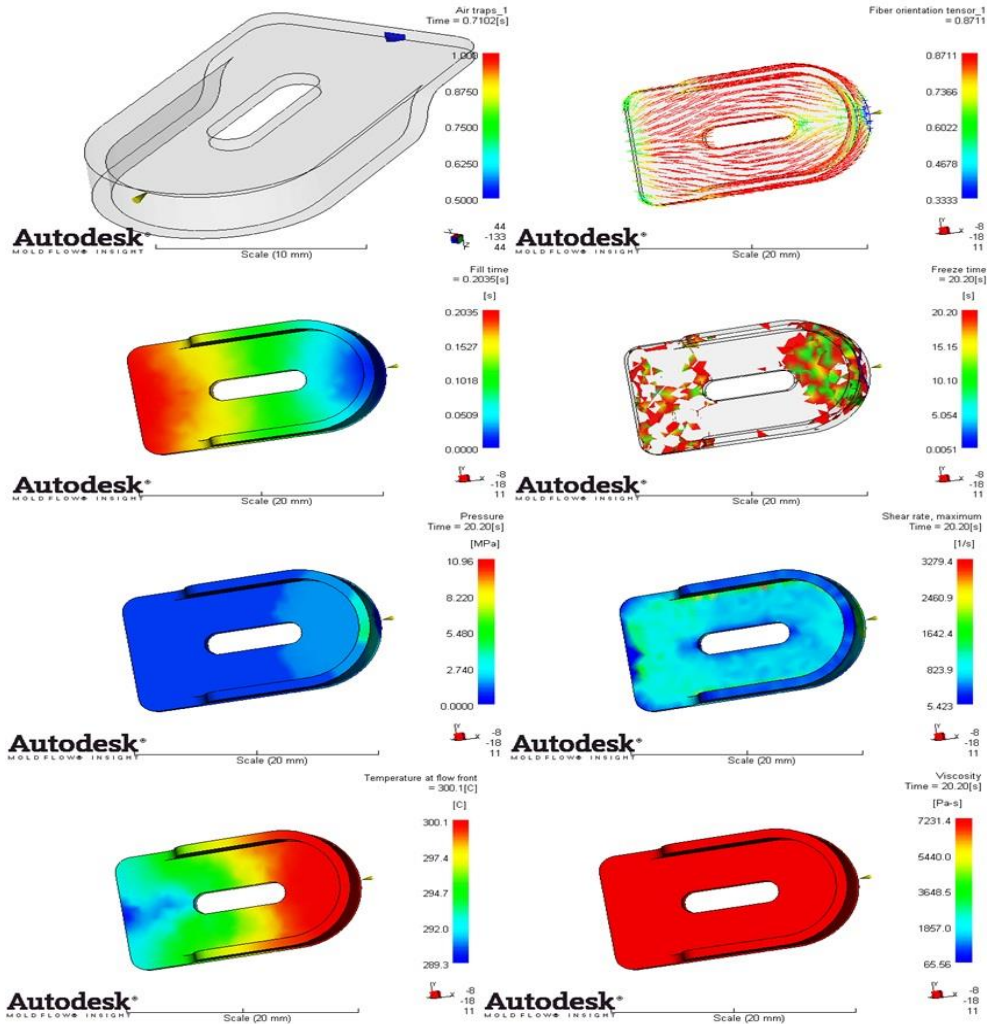
<b>Diam rețea [mm]</b>	<b>Lungim e max. rețea [mm]</b>	<b>Material</b>	<b>Timp de injectare [s]</b>	<b>Temp. topiturii [°C]</b>	<b>Viteza de forfecar e maximă [s<sup>-1</sup>]</b>	<b>Timpul ciclului de injectar e [s]</b>
3	100	ABS	0,9415	223,3	1596,3	10,93
3	100	PA6	5,201	274,5	278,8	15,15
3	100	PBT	1,981	261,1	761,6	11,96
3	100	PE	1,674	251,6	896,7	11,66
3	100	PET	1,340	291	1110,8	11,32
3	100	POM	3,507	217,3	423,8	13,46
2,9	95	ABS	1,579	227,9	626,4	21,56
2,9	95	PA6	5,724	275,2	179	25,66
2,9	95	PBT	2,122	262,9	395,1	22,16
2,9	95	PE	1,988	256,2	484	21,96
2,9	95	PET	1,34	292,3	679,6	21,32
2,9	95	POM	4,37	219,6	216	24,3
2,8	92	ABS	1,470	224,1	828,1	21,45
2,8	92	PA6	5,524	274,9	225,3	25,46
2,8	92	PBT	2,092	261,7	668,2	22,07
2,8	92	PE	1,884	253,2	649,9	21,86
2,8	92	PET	1,343	291,7	920,3	21,33
2,8	92	POM	4,262	218,2	285,8	24,21
2,7	88	ABS	1,472	224,2	568,8	21,45
2,7	88	PA6	5,424	274,8	133,8	25,36
2,7	88	PBT	2,096	261,8	326,1	22,07
2,7	88	PE	1,986	253,1	406,7	21,96
2,7	88	PET	1,241	291	546,6	21,23
2,7	88	POM	4,172	218,3	198,6	24,11
2,6	85	ABS	1,475	225,2	599,5	21,46
2,6	85	PA6	5,33	275,7	160,9	25,27
2,6	85	PBT	1,986	262,1	444,2	21,96
2,6	85	PE	1,887	253,1	466,6	21,86
2,6	85	PET	1,238	291	706,2	21,22
2,6	85	POM	4,068	218,8	214,1	24
2,5	82	ABS	1,366	225,5	663,3	21,35
2,5	82	PA6	5,216	275,1	200,7	25,16
2,5	82	PBT	1,986	262,7	454,1	21,96
2,5	82	PE	1,985	254,4	456,7	21,96
2,5	82	PET	1,238	291,3	744,6	21,22

2,5	82	POM	3,965	219,7	227,8	23,9
<b>2,4</b>	78	ABS	1,154	225,1	1817,3	21,14
<b>2,4</b>	78	PA6	4,299	275,4	479,1	24,25
<b>2,4</b>	78	PBT	1,675	262,6	1260,9	21,65
<b>2,4</b>	78	PE	1,671	254,2	1254,5	21,64
<b>2,4</b>	78	PET	0,9021	291,4	2238,9	20,92
<b>2,4</b>	78	POM	3,438	219,3	602,9	23,39
2,3	75	ABS	1,163	236,3	1567,1	21,14
2,3	75	PA6	4,229	275,6	324,7	24,15
2,3	75	PBT	1,526	265,8	846,7	21,55
2,3	75	PE	1,566	260,8	955,6	21,55
2,3	75	PET	0,9283	287,1	1339,2	20,98
2,3	75	POM	3,35	222,3	549,1	23,29
<b>2,2</b>	72	ABS	1,162	226,9	2272,4	21,15
<b>2,2</b>	72	PA6	4,103	277,1	594	24,05
<b>2,2</b>	72	PBT	1,574	262,5	1654,3	21,54
<b>2,2</b>	72	PE	1,563	255	1665,6	21,54
<b>2,2</b>	72	PET	0,9224	291,5	2727,2	20,91
<b>2,2</b>	72	POM	3,227	219,8	766,3	23,18
2,1	68	ABS	1,053	226,1	1880,3	21,04
2,1	68	PA6	3,992	275,5	469,7	23,95
2,1	68	PBT	1,571	261,8	1359,8	21,55
2,1	68	PE	1,571	254,7	1383,6	21,55
2,1	68	PET	0,8249	291,8	2358,9	20,81
2,1	68	POM	3,235	219,1	594,1	23,19
<b>2</b>	65	ABS	1.052	225,7	907,2	21,04
<b>2</b>	65	PA6	3,992	275,6	204,7	23,94
<b>2</b>	65	PBT	1,466	262,6	616,2	21,45
<b>2</b>	65	PE	1,57	254,4	578,5	21,55
<b>2</b>	65	PET	0,8256	291,4	1002	20,82
<b>2</b>	65	POM	3,135	302,5	219,3	23,09
1,9	62	ABS	0,9447	225,8	3900,7	20,93
1,9	62	PA6	3,614	275,5	987,5	23,54
1,9	62	PBT	1,359	262,7	2711,7	21,64
1,9	62	PE	1,358	255	2713,2	21,34
1,9	62	PET	0,7209	291,5	5012,2	20,71
1,9	62	POM	2,914	219,5	1226	22,88
<b>1,8</b>	59	ABS	0,9471	228,2	1646,7	20,93
<b>1,8</b>	59	PA6	3,81	257,9	315,9	23,54
<b>1,8</b>	59	PBT	1,361	263,5	953,1	21,34
<b>1,8</b>	59	PE	1,358	256	1005,1	21,34
<b>1,8</b>	59	PET	0,7224	293,3	1734,8	20,71
<b>1,8</b>	59	POM	2,926	220,1	467,4	22,88
1,7	55	ABS	0,9555	227,9	1193,8	20,94
1,7	55	PA6	1,354	273,8	1315,9	21,33
1,7	55	PBT	1,358	263,5	1069,2	21,34
1,7	55	PE	1,361	255,8	1217,5	21,34
1,7	55	PET	0,7182	291,4	1080	20,71
1,7	55	POM	2,822	219,8	359,8	22,78

<b>1,6</b>	52	ABS	0,9624	230,1	2039,3	20,95
<b>1,6</b>	52	PA6	1,357	273,9	1395,1	21,34
<b>1,6</b>	52	PBT	1,358	263,2	1441,6	21,34
<b>1,6</b>	52	PE	1,369	257,4	1428,2	21,35
<b>1,6</b>	52	PET	0,6159	292,4	3097,1	20,61
<b>1,6</b>	52	POM	2,825	219,3	626,1	22,78
1,5	49	ABS	0,8534	231,2	1971,3	20,84
1,5	49	PA6	1,254	275,7	1475,5	21,23
1,5	49	PBT	1,151	264,7	1423,6	21,13
1,5	49	PE	1,154	258,3	1607,1	21,14
1,5	49	PET	0,6165	292,9	2590,1	14,31
1,5	49	POM	2,513	222,1	625,1	22,47
<b>1,4</b>	44	ABS	0,8544	230,7	2514,2	20,84
<b>1,4</b>	44	PA6	1,265	275,8	1759,9	21,23
<b>1,4</b>	44	PBT	1,144	264,5	1728,5	15,46
<b>1,4</b>	44	PE	1,237	256,3	1684,9	21,12
<b>1,4</b>	44	PET	0,5127	292,4	3791	20,51
<b>1,4</b>	44	POM	2,507	221,3	729,3	25,07
1,3	39	ABS	0,7580	231,8	2580,6	20,75
1,3	39	PA6	1,265	274	1420,3	21,24
1,3	39	PBT	1,164	263,9	1862,8	21,15
1,3	39	PE	1,838	258,2	1228	21,63
1,3	39	PET	0,497	291,9	2785,2	20,2
1,3	39	POM	2,347	273,5	827,9	24,36
<b>1,2</b>	34	ABS	1,378	226,7	5679,7	21,35
<b>1,2</b>	34	PA6	1,496	274,5	3928,4	21,45
<b>1,2</b>	34	PBT	1,01	272	6743,9	20,97
<b>1,2</b>	34	PE	2,464	258	2528,7	22,38
<b>1,2</b>	34	PET	1,566	292,5	5161,4	21,53
<b>1,2</b>	34	POM	14,55	219,7	1024,5	30,91
1,1	28	ABS	1,259	228,4	3476,3	20,92
1,1	28	PA6	1,385	274,9	2089	21,26
1,1	28	PBT	1,113,8	264,2	3790	21,1
1,1	28	PE	2,638	257,3	2268,2	21,5
1,1	28	PET	0,873,9	292,3	4128,6	20,83
1,1	28	POM	2,750	225,8	1108,2	26,3
<b>1</b>	22	ABS	1,284	225,3	2840	21,2
<b>1</b>	22	PA6	1,4273	274,3	1615,7	21,4
<b>1</b>	22	PBT	0,9834	263,8	2167,3	20,89
<b>1</b>	22	PE	2,130	258	1670,6	21,48
<b>1</b>	22	PET	0,676	293	3289	20,78
<b>1</b>	22	POM	2,783	220,7	1264	24,8
0,9	19	ABS	1,360	230,6	3184,5	21,04
0,9	19	PA6	1,3792	275,1	1489,1	21,27
0,9	19	PBT	0,9982	266,5	1956,8	21,28
0,9	19	PE	1,8691	256,9	1873,9	21,5
0,9	19	PET	1,259	292,6	3008,4	21,04
0,9	19	POM	2,2185	223	1283,2	31,04

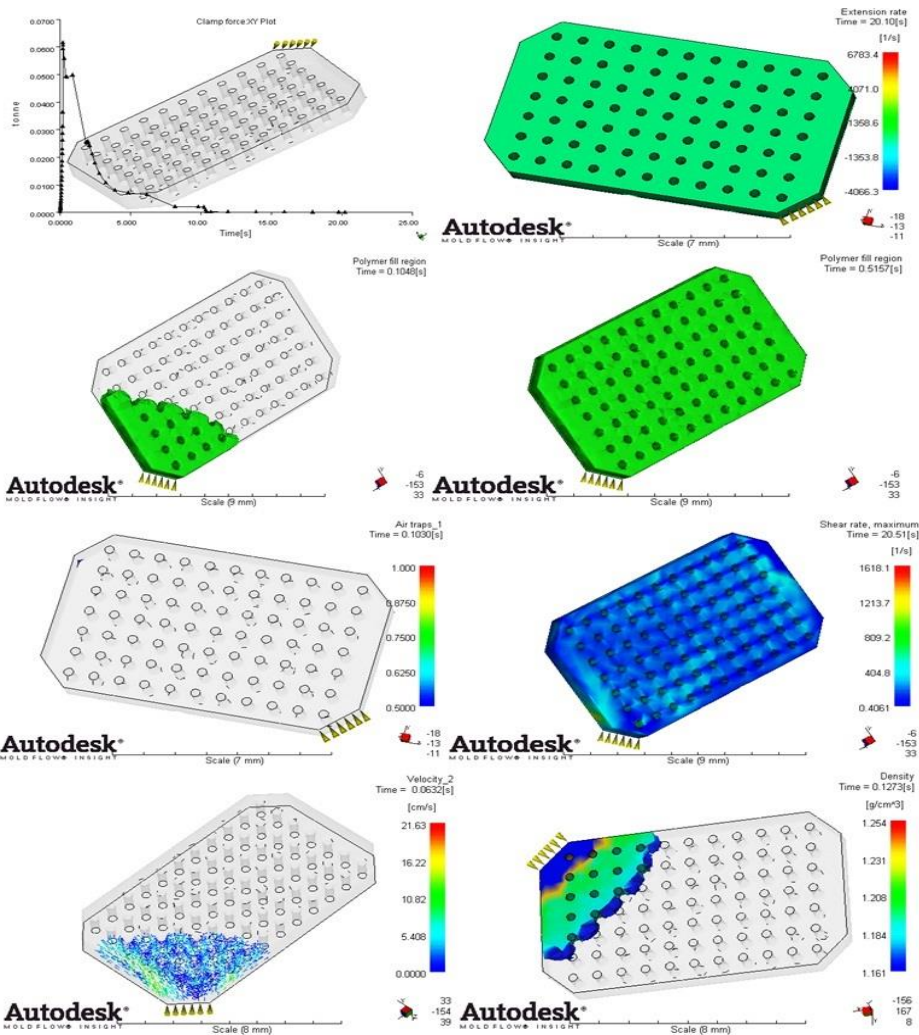
**Modele referențiale din industria IT**  
**Piesă cu pereți subțiri**

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Temperatura frontului de curgere [°C]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topirii [°C]
SAN	0,3147	3029	220,2	20,31	226
POM	1,671	525,7	200,4	21,65	203
PP	0,313	2187,7	227,1	20,31	230,1
LCP	0,7102	8647	295,1	20,7	297,8
PCT	0,2035	3279,4	300,1	20,2	302,6



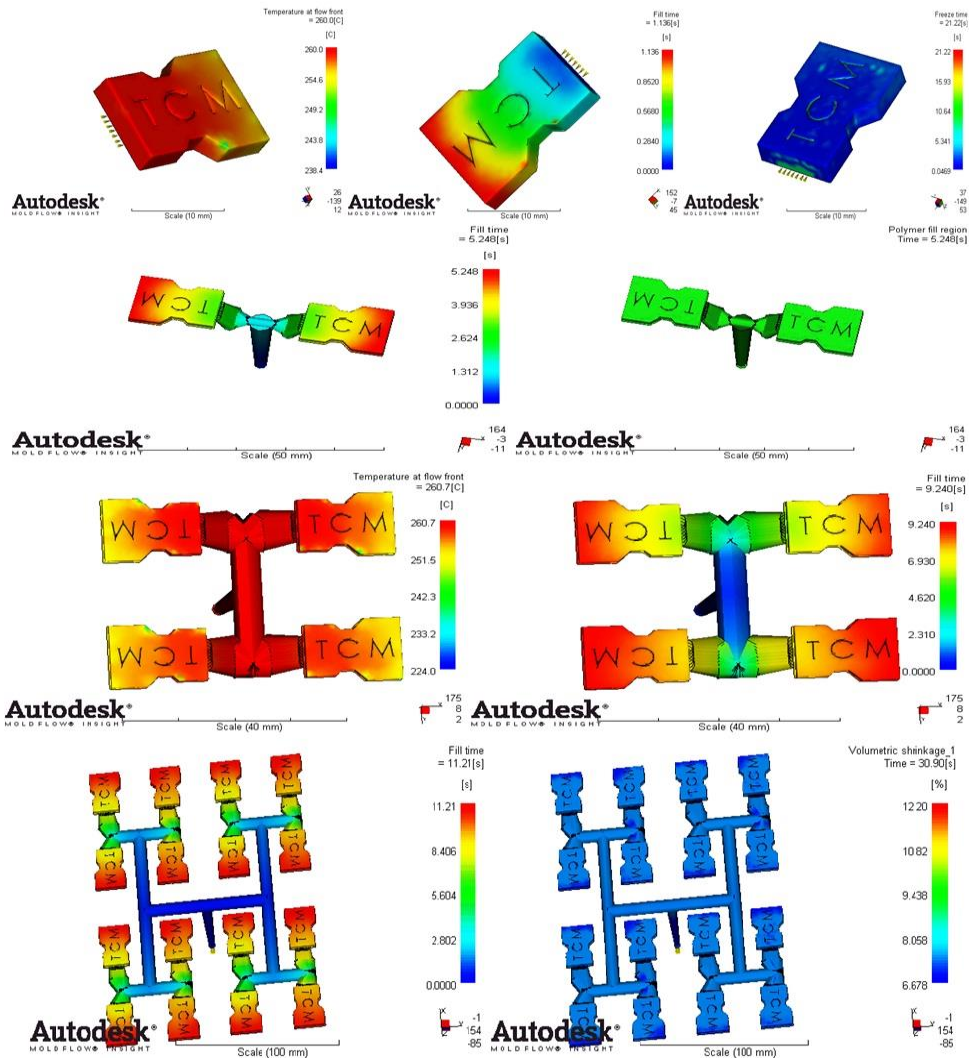
**Placă din industria electronică**

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Temperatura frontului de curgere [°C]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topiturii [°C]
HDPE	0,2107	4360,1	240,3	20,21	245,6
LLDPE	0,1030	7536,4	190,5	20,1	194,5
PS	0,3131	3222,2	200,3	20,31	206,8
POM	0,622	1424,4	215,3	20,61	218,8
PA6	0,5157	1618,1	255,1	20,51	257,8
PE	0,3112	2660,1	250,2	20,31	255,1



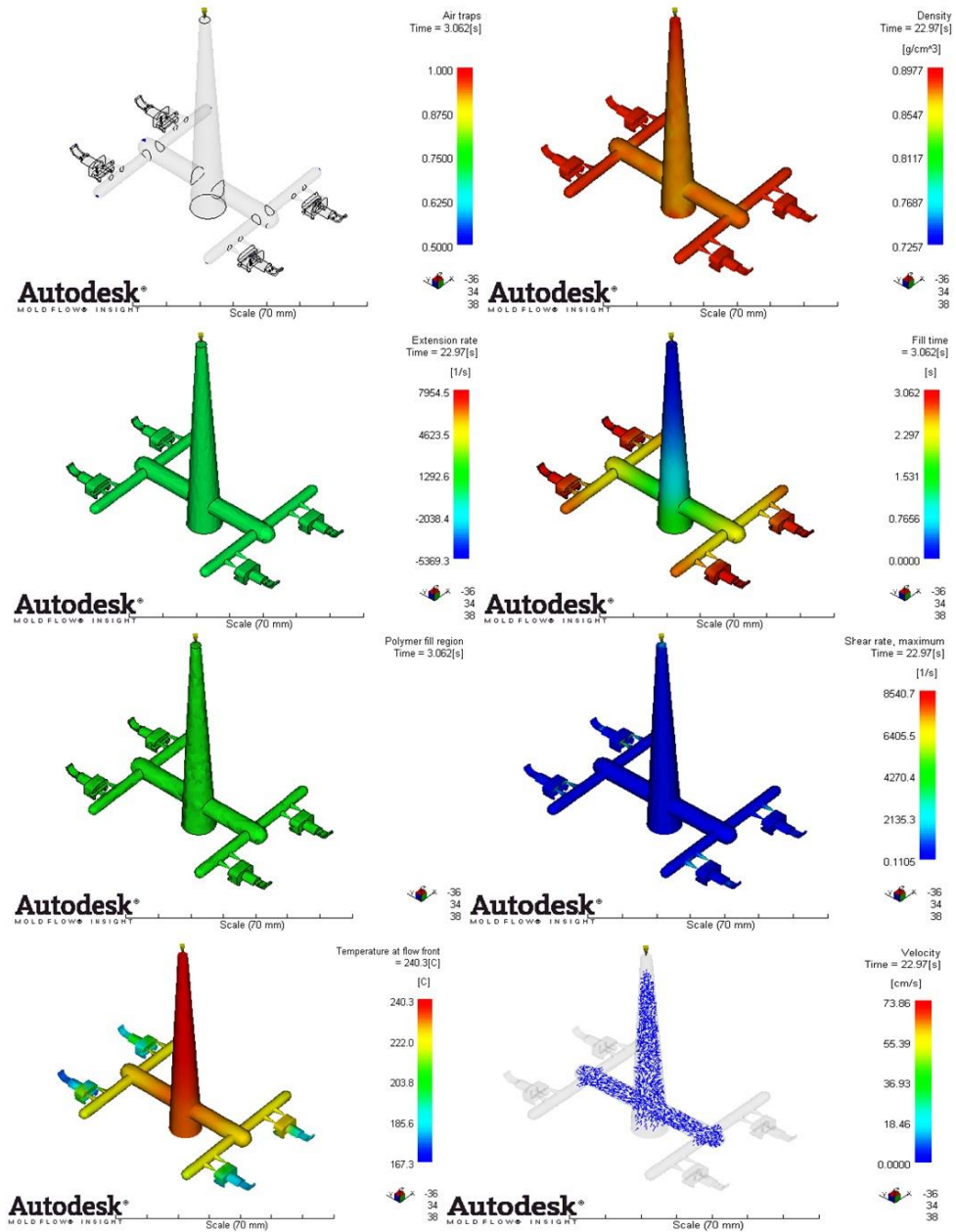
**Mufă pentru industria electronică**

Material	Timp de injectare [s]	Viteza de forfecare maximă [s <sup>-1</sup> ]	Temperatura frontului de curgere [°C]	Timpul ciclului de injectare [s]	Temp. topirii [°C]
ABS1	2,454	86,26	260	22,43	261,3
ABS2	1,136	189,7	260,1	21,12	267,6
ABS3	1,239	173,3	260,1	21,23	267,3
ABS2cuib	5,248	244,1	260,5	25,18	261,3
ABS4cuib	9,24	474,9	260,7	29,05	261,07
ABS16cuib	11,21	2123	262,8	30,9	265,3



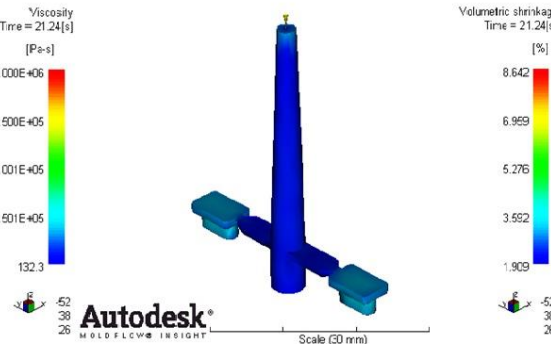
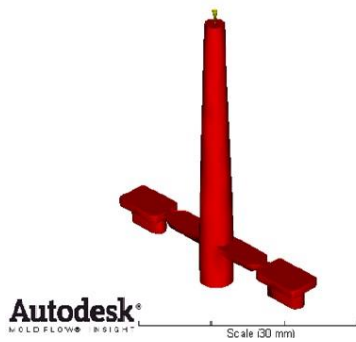
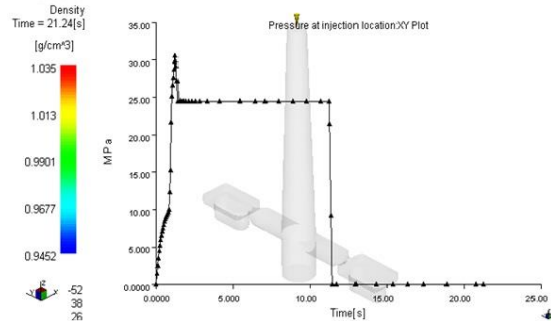
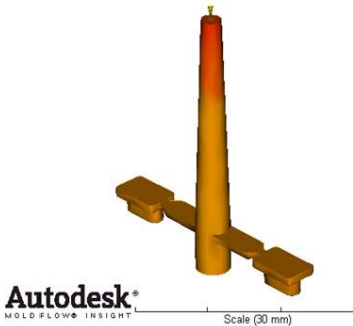
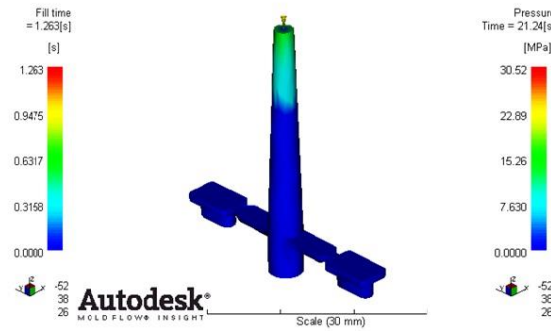
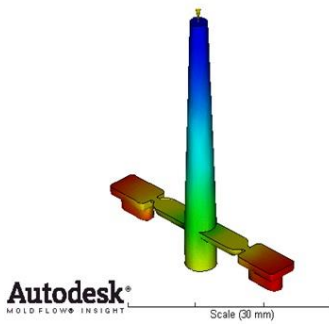
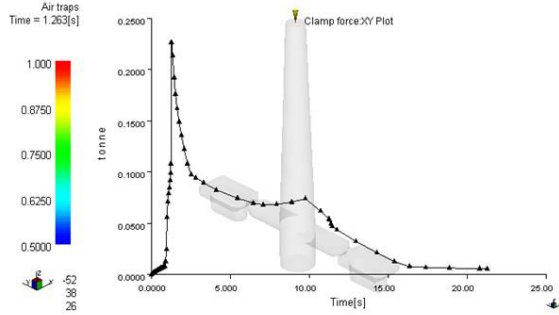
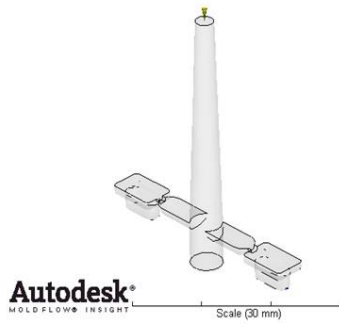


## Simulări de curgere pentru matrițe cu mai multe cuiburi *Matriță cu patru cuiburi*

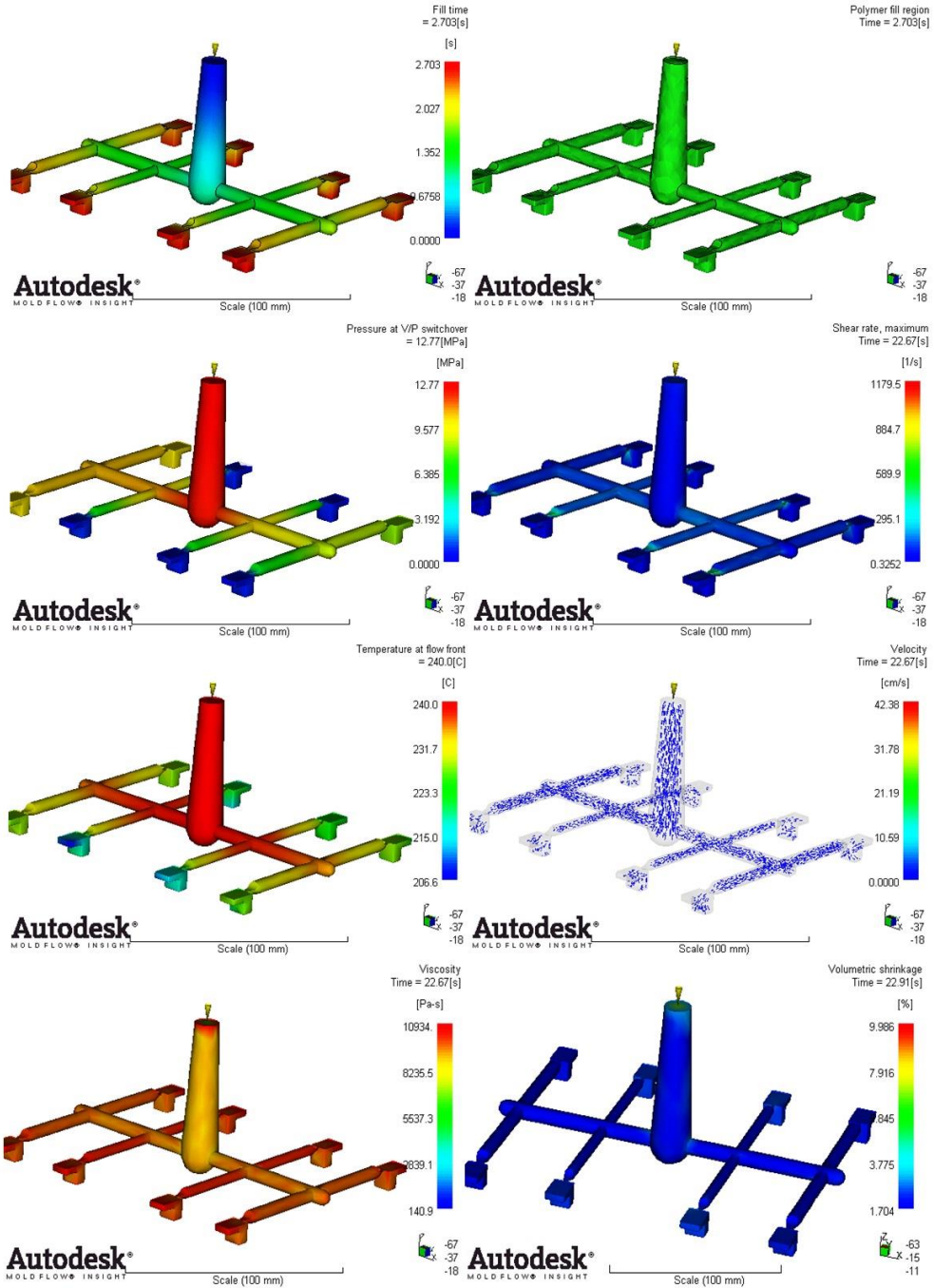




### Matriță cu două cuiburi



### Matriță cu opt cuiburi



## Bibliografie

- [Advanced, 2011]- Advanced Finite elements method, 2011- (<http://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/AFEM.d/AFEM.Ch01.d/AFEM.Ch01.Slides.d/AFEM.Ch01.Slides.pdf>), (12.02.2011)
- [AKI, 2010]- aki moulding the future, 2010- plastic injection moulding product realization, ([http://www.aki.co.uk/in\\_mould\\_insert\\_moulding](http://www.aki.co.uk/in_mould_insert_moulding)), (17.02.2010)
- [Albright, 2009]- Albright Lyle F., 2009- Albright's Chemical Engineering Handbook, ISBN 13: 978-0-8247-5362-7, Taylor & Francis Group, LLC
- [Asua, 2007]- Asua José M, 2007- Polymer Reaction Engineering, ISBN: 978-1-4051-4442-1, Blackwell Publishing Ltd, Oxford
- [Autodesk, 2010] MoldFlow 2010 help (<http://usa.autodesk.com/moldflow/>), accessed (17.02.2011)
- [BabyPlast, 2007]-BabyPlast, 2007-Micro Molding Machinery, accessed (22.11.2007) from (<http://www.babyplast.net/>)
- [Babyplast] Babyplast, Introducing the Babyplast 6/10P micro-moulding machine, Brochure, accessed from ([www.babyplast.net](http://www.babyplast.net)) at (16.09. 2009)
- [Bair, 2007]-Bair Scott, 2007- High Pressure Rheology for Quantitative Elastohydrodynamics, Volume 54 Tribology and Interface Engineering), Elsevier Science, ISBN-10: 0444522433
- [Bariani, 2007]-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, accessed in (06.03.2009) from (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607002051>)
- [Blythe, 2005]- Blythe Tony, Bloor David, 2005-Electrical Properties Of Polymers Second Edition, ISBN 13-978-0-521-55219-6, Cambridge University Press
- [BMB, 2003] Battenfeld Microsystem, Brochure, Injection Molding Technology, 05.2003, accessed from ([www.battenfeld.com](http://www.battenfeld.com)) at (22.03.2009)
- [Bourell, 2011] - Bourell David, Rajurkar Kamlakar, 2010-MATERIALS, accessed in (12.06.2010) from (<http://www.wtec.org/micromfg/report/03-Materials.pdf>)
- [Bourdon, 2002] Bourdon Rainer, Schneider Werner, 2002 -A Systematic Approach to Microinjection Moulding, Technology & Services, ([http://www.touchbriefings.com/pdf/753/mdev02\\_t\\_rkt.pdf](http://www.touchbriefings.com/pdf/753/mdev02_t_rkt.pdf) )
- [Brandrup, 1998] Brandrup J., Immergut E. H., Grulke E. A., Abe A., Bloch D. R., 1998, Polymer Handbook- ISBN-0-471-16628-6
- [Brent, 2006]-Brent A., 2006-Materials and Processing, Pearson Prentice Hall ISBN 0-13-114558-4
- [Brydson, 1999]-Brydson J.A.,1999-Plastics Materials Seventh Edition, Printed in Great Britain by Biddles Ltd Guildford and King's Lynn, ISBN 0 7506 4132 0
- [Campo, 2006]-Campo Alfredo E., 2006 - The Complete Part Design Handbook For Injection Molding of Thermoplastics, Carl Hanser Verlag, ISBN-10: 3-446-40309-4,
- [Carvill, 1993]-Carvill James, 1993-Mechanical Engineer's Data Handbook, Bookcraft (Bath) Ltd, Somerset, Manchester, ISBN 0 7506 1960 0,
- [Catia, 2010] tutorial Catia FEM accessed in (14.11.2010) from site ([http://www.4shared.com/document/4HbhgVTW/Catia\\_Tutorial\\_FEM.html](http://www.4shared.com/document/4HbhgVTW/Catia_Tutorial_FEM.html))

- [Cavalheiro 2004]- Prof. Andrei Cavalheiro, 2004 Apresentação: MOLDAGEM POR INJEÇÃO, noções do projeto de moldes CEFET-RS
- [Chang, 2007] – Chang Dae Han, 2007 - Rheology and Processing of Polymeric Materials, Vol. 2, Polymer Processing, Oxford University Press Inc., New York, www.oup.com, ISBN: 978-0-19-518783-0
- [Chhabra, 1999] – Chhabra R.P., 1999, Non-newtonian flow in the process industries, Fundamentals and Engineering Applications, pp. 1-28, 1, Editura Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-3770-6
- [Connor, 1976] – Connor J.J., Brebbia C.A., 1976-Finite Element Techniques for Fluid Flow, Butterworth & Co (Publishers) Ltd, Year 1976, ISBN:0-408-00176-3
- [Cosma, 2008] Cosma Cristian, Dume Adrian-Ilie, **Rotar Daniel**, Iclănzan Tudor, "The Methodology of Obtaining Postprocessor for ISEL Milling Machine", Buletinul Științific al Universității Politehnica din Timișoara, Seria Mecanică, Fasc. 2, pp. 101-108, 2008, ISSN 1224-6077
- [Cosma, 2011] Cosma Cristian, **Rotar Daniel**, Cioană Cristian, Șerban Iancu, "Redesigning Plastic Products", Revista de Materiale Plastice, 48, no 3, pp. 259-262, Septembrie 2011, ISSN 0025/5289
- [Crowford, 2004] –Crowford R.J. , 2004- Plastics Engineering Third Edition, Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-3764-1
- [Demag, 2011]-Demag Plastics Group, 2011- Micro-injection Moulding Technology– Machines –Markets, accesed in (03.05.2011) from ([http://www.sumitomo-shi-demag.eu/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Technologien\\_-\\_Download/TP\\_Micro-InjectionMoulding\\_gb.pdf](http://www.sumitomo-shi-demag.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/Technologien_-_Download/TP_Micro-InjectionMoulding_gb.pdf)),
- [DirectIndustry, 2008] - DirectIndustry - The Virtual Industrial Exhibition accesed in (25.04.2008) from (<http://www.directindustry.com>)
- [Donea, 2003] – Donea Jean and Huerta Antonio, 2003-Finite Element Methods for Flow Problems, John Wiley & Sons Ltd., England, ISBN: 0-471-49666-9
- [Drobny, 2007] Drobny Jiri George, 2007 - Handbook of Thermoplastic Elastomers, Edited by William Andrew Inc, ISBN: 978-0-8155-1549-4
- [DSM, 2010] ([http://www.dsm.com/en\\_US/html/dep/gatetype.htm](http://www.dsm.com/en_US/html/dep/gatetype.htm))
- [Dubois, ...] - Dubois Harry J., Pribble Waynei.I. – Plastics Mold Engineering Handbook, Fourth Edition, Manukau Polytechnic
- [Dume, 2008] Dume Adrian-Ilie, Cosma Cristian, **Rotar Daniel**, Iclănzan Tudor, "Algorithm for Obtaining a Piece on CNC with a Surface Scanned by the Modela MDX 15", Buletinul Științific al Universității Politehnica din Timișoara, Seria Mecanică, Fasc. 2, pp. 93-99 ,2008, ISSN 1224-6077
- [Ecs, 2007] - Ecs, 2007 – Injection Molding Microstructures, accesed in (01.10.2008), from (<http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/injection/index.html>)
- [Erhard, 2006 ]- Erhard Gunter, 2006- Designing With Plastics, Carl Hanser Verlag, Munich, ISBN-10: 3-446-22590-0
- [Fetecau, 2005] – Fetecău Cătălin, 2005-Aspecte reologice la prelucrarea materialelor plastice prin injectare. Faza de umplere,Revista de Materiale Plastice, București, Vol. 42, nr. 4, 2005, pp. 291-293
- [Fetecau, 2007] – Fetecău Cătălin, 2007-Injectarea Materialelor Plastice, Ediția a doua, Editura Didactică și Pedagogică, București, ISBN 978-973-30-1971-8
- [Fetecău, 2010] – Fetecău Cătălin, Stan Felicia, Dobrea Daniel, 2010-Investigation of the adhesion interface obtained through two-component injection molding,

- International Conference "Advances in Materials and Processing Technologies", (AMPT 2010), 23-27 October, 2010, Paris
- [Fischer, 2003]- Fischer Jerry M., 2003-Handbook Of Molded Part Shrinkage and Warpage, ISBN: 1-884207-72-3, William Andrew, Inc.
- [FKHG, 2011]-Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2011- Injection Molding of Microcomponents from Plastics, Ceramics or Metals ([http://141.52.27.55/fzk/groups/nanomikro/documents/internetdokument/id\\_055399.pdf](http://141.52.27.55/fzk/groups/nanomikro/documents/internetdokument/id_055399.pdf)), accessed in (08.30.2011)
- [Foley, 2001] Foley Michael F., 2001 - Opto-Northeast and Imaging, NE04-21: Microstructured Plastic Optics for Display, Lighting, and Telecommunications Applications, Fresnel Optics, A Reflexite Company, accessed in (20.11.2009) from ([http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:gNITyxjDTgsJ:club.wassada.com/iclub.asp%3Fclub\\_id%3Ddiypro%26code%3D2%26mode%3Ds\\_download%26num%3D24407+Opto-Northeast+and+Imaging+2001+NE0421:+Microstructured+Plastic+Optics+for+Display,+Lighting,+and+Telecommunications+Applications+By+Michael+F.+Foley,+PhD&hl=ro&gl=ro&pid=bl&srcid=ADGEESjtNE5u4NcICQaCn2Jo-1jKScQ6E6UJcTIMovL8qJmHJ9DUpk3D2IHb0c9i5bzOtgQ2TcRN96ArABRSYntjF3kZ\\_hxd0YTJHwNH\\_kU7BYosFhD6iS7tmleJzo1KTV8USaXvnHsf&sig=AHIEtbSOLiZauA9usxLANJ5pTUvXUHKdrw](http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:gNITyxjDTgsJ:club.wassada.com/iclub.asp%3Fclub_id%3Ddiypro%26code%3D2%26mode%3Ds_download%26num%3D24407+Opto-Northeast+and+Imaging+2001+NE0421:+Microstructured+Plastic+Optics+for+Display,+Lighting,+and+Telecommunications+Applications+By+Michael+F.+Foley,+PhD&hl=ro&gl=ro&pid=bl&srcid=ADGEESjtNE5u4NcICQaCn2Jo-1jKScQ6E6UJcTIMovL8qJmHJ9DUpk3D2IHb0c9i5bzOtgQ2TcRN96ArABRSYntjF3kZ_hxd0YTJHwNH_kU7BYosFhD6iS7tmleJzo1KTV8USaXvnHsf&sig=AHIEtbSOLiZauA9usxLANJ5pTUvXUHKdrw))
- [Franssila, 2004]- Sami Franssila, 2004 - Introduction to Microfabrication, edited by John Wiley & Sons Inc, ISBN 0-470-85106-6
- [Fuchs, 2007] - Barbara Fuchs, 2007- Battenfeld Injection Molding Technology All-electric energy efficiency and precision down to the single-digit milligram range, ([www.battenfeld-imt.com/Aktuelles/Pressemitteilungen](http://www.battenfeld-imt.com/Aktuelles/Pressemitteilungen)), accessed in (20.11.2009)
- [Galway, 2010]- GALWAY, 2010-REPORT+RESULTS GALWAY TOOL & MOULD LTD. (<http://www.galwaytoolandmould.com/ireland-mould-precision-news.php?id=8>), accessed in (04.11.2010)
- [Gava, 2001] Milton Gava, 2001 -Ferramenteiro de moldes para termoplásticos SENAI-SP Mario Amato (<http://www.scribd.com/doc/19534660/FERRAMENTEIRO-DE-MOLDES-PARA-PLASTICOS-SENAI-MARIO-AMATO>), accessed in (16.03.2010)
- [Ghionea, 2007] Ionuț Gabriel Ghionea, 2007- Proiectare asistată în CATIA V5, Editura Bren, 2007, București, Romania, ISBN 978-973-648-654-8
- [Giboz, 2007] - Giboz Julien, Copponnex Thierry, Mélé Patrice, 2007-Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review, Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 17 ,Number 6 , DOI: 10.1088/0960-1317/17/6/R02 , IOP Publishing, pp.96-109, (<http://iopscience.iop.org/0960-1317/17/6/R02;jsessionid=948A28646686850D00650FC6A97BC91B.c2>), accessed in (06.06.2009)
- [Giboz, 2011]-Giboz Julien, Copponnex Thierry, Mélé Patrice, 2011-Microinjection moulding of thermoplastic polymers: from theory to experiment, (<http://www.4m-net.org/files/papers/4M2007/367252/PID367252.pdf>), accessed in (26.11.2011)
- [Gnanou 2008]- Gnanou Yves, Fontanille Michel, 2008- Organic And Physical Chemistry Of Polymers, Edited by John Wiley & Sons, Inc., New Jersey , ISBN 978-0-471-72543-5,
- [Gooch, 2002] Gooch Jan W., 2002- Analysis and Deformulation of Polymeric Materials, ISBN: 0-306--46908-1, Kluwer Academic Publishers
- [Gooch, 2007]- Gooch Jan W., 2007-Encyclopedic Dictionary of Polymers, Springer Science+Business Media, ISBN 13:978-0-387-31021-3
- [Goodship, 2004] - Goodship Vanessa, 2004 - Practical Guide to Injection Moulding, ISBN: 1-85957-444-0, Rapra Technology

- [Groenewoud, 2001] – Groenewoud W. M., 2001-Characterisation of Polymers by Thermal Analysis, Elsevier Science B.V, Netherlands, ISBN: 0-444-50604-7
- [Gupta, 2010] - Gupta Rakesh K., Kennel Elliot, Kim Kwang-Jea, 2010 - Polymer Nanocomposites Handbook, ISBN 978-0-8493-9777-6, Taylor and Francis Group
- [GUT, 2011] (<http://www.guttenbergind.com/Gates.html>)
- [Harper, 2000] - Harper Charles A., 2000- Modern Plastics Handbook, Publishing, McGraw-Hill, ISBN 0-07-026714-6
- [Harper, 2004] - Harper Charles A., 2004 - Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites 4<sup>th</sup> Edition, ISBN 0-07-138476-6, The McGraw-Hill Companies
- [Harper, 2006] - Harper Charles ,2006-Handbook Of Plastics Tehnologies, The Complet Guide To Properties And Performance, McGraw-Hill, ISBN 0-07-146068-3
- [Holmberg, 2002] - Holmberg Krister, Bo Jönsson, Kronberg Bengt, Lindman Björn, 2002- Surfactants and Polymers in Aqueous Solution, ISBN: 0-471-49883-1, John Wiley & Sons, Ltd.
- [Holland, 1995]- Holland F. A., Bragg R., 1995 - Fluid Flow for Chemical Engineers, Second edition, I ,Edward Arnold, a division of Hodder Headline PLC, ISBN 0 340 61058
- [Houghton, 2003] - Houghton E.L., Carpenter P.W., 2003- Aerodynamics for Engineering Students Fifth Edition, ISBN 0 7506 5111 3, Butterworth-Heinemann
- [Hsu, 2011] Hsu Jui-Mei; Kammer Sascha; Jung Erik; Rieth Loren; Normann Richard; Solzbacher Florian, 2011- Characterization of Parylene-C Thin Films as an Encapsulation for Neural, Interfaces, accesed in (21.04.2011) from (<http://www.4m-net.org/files/papers/4M2007/374451/Slides-PID374451.pdf>),
- [Hutton, 2004] – Hutton David V., 2004-Fundamentals of Finite Element Analysis, Published by McGraw-Hill, New York, America, ISBN: 0-07-239536-2, [www.mhhe.com](http://www.mhhe.com)
- [Hwee, 2007] - CHING HWEE INTERNATIONAL TRADING CO., LTD., 2007-Taiwan Products, Plastic Injection Machines, (<http://www.b2bdiecasting.com/products.htm>), accesed in (07.02.2008)
- [Hubertus, 2005] - Maurice Hubertus Elisabeth van der Beek, 2005-Specific volume of polymers Influence of the thermomechanical history, ISBN 90-386-2567-7
- [Iancau, 2003] – Iancau Horatiu, Nemes Ovidiu; 2003; Materiale compozite- Conceptie si fabricatie, Editura Media Mira, Cluj Napoca 2003
- [Iclanzan, 2006] Iclanzan Tudor, Tehnologia Prelucrarii Materialelor Plastice si Compozite, Editura Politehnica, Timisoara, 2006
- [Iclanzan, 2010] Iclănzan Tudor, Șerban Iancu, **Rotar Daniel**, Țuț Vlad, "Ultrasonic Activation, a Possible Alternative Application in the Microinjection Molding", International Journal of Material Forming, Volume 3, Issue SUPPL. 1, April 2010, Pages 547-550, ISSN: 19606206.
- [Imgrund, 2007] - Imgrund Philipp, Rota Astrid, 2007 -Metal injection molding at micro scale, Kunststoffe International Carl Verlag, Munich ,accesed in (12.10.2010) ([http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/mikrofertigung/mf\\_artikel\\_kunststoffe\\_international\\_6\\_07.pdf](http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/mikrofertigung/mf_artikel_kunststoffe_international_6_07.pdf) )
- [Imold, 2011] (<http://imoldmaking.com/mold-making-2/mold-design/runner-and-gate/different-types-of-gate-for-injection-molding/>)
- [IPT, 2009] - Fraunhofer institut produktionstechnologie, 2009 - European Research Project Micro-Milling, accesed in (30.04.2009), (<http://www.ipt.fraunhofer.de/en/>)



- [Jackson, 2006] - Jackson Mark J., 2006, Microfabrication And Nanomanufacturing, ISBN: 978-0-8247-2431-3, Taylor & Francis Group
- [Jones, 2008] Jones Peter, 2008 - The Mould Design Guide, Edited by Rapra Technology, ISBN: 978-1-84735-088-6
- [Jung, 2007] - Jung Woo-Chul, Heo Young-Moo, Yoon Gil-Sang, Shin Kwang-Ho, Chang Sung-Ho, Kim Gun-Hee, Cho Myeong-Woo, 2007 - Micro Machining of Injection Mold Inserts for Fluidic Channel of Polymeric Biochips, *Sensors* 2007, Vol. 7, ISSN 1424-8220, pp.1643-1654, MDPI, accessed at (18.04.2009) from site (<http://www.mdpi.com/1424-8220/7/8/1643/pdf>)
- [Kaiser, 2006] - Kaiser Wolfgang, 2006 - Kunststoffchemie für Ingenieure, Carl Hanser Verlag München-Wien, ISBN 3-446-22069-0
- [Kallien, 2011] - Kallien Lothar, 2011 - Optimization of the Injection Moulding Process for Thermoplasts With 3D Simulation, ([http://www.sigmasoft.de/ftp/web/\\_data/Optimization\\_of\\_the\\_Injection\\_Moulding\\_Process\\_for\\_Thermoplastics.pdf](http://www.sigmasoft.de/ftp/web/_data/Optimization_of_the_Injection_Moulding_Process_for_Thermoplastics.pdf))
- [Karlberg, 1989] - Karlberg Bo, Pacey Gil E., 1989-Flow Injectoin Analysis, A Practical Guide, Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry, Vol.10, Elsevier Science Publisher B. V., ISBN: 0-444-88014-3, Printed in Netherlands
- [Kemme, 2010] - Kemme Shanalyn A., 2010 - Microoptics And Nanooptics Fabrication, ISBN 978-0-8493-3676-8, Taylor and Francis Group
- [Kim\_a, 2007] - Kim Jong Sun, Ko Young Bae, Hwang Chul Jin, Kim Jong Deok, Yoon Kyung Hwan, 2007 - Fabrication of micro injection mold with modified LIGA micro-lens pattern and its application to LCD-BLU, Korea-Australia Rheology Journal, November 2007, Vol. 19, No. 3, pp.165-169, accessed at (14.02.2008) from (<http://www.cheric.org/PDF/KARJ/KR19/KR19-3-0165.pdf>)
- [Kim\_b, 2007]-Kim Jong Sun, Ko Young Bae, Hwang Chul Jin, Kim Jong Deok, Yoon Kyung Hwan, 2007-A study on the fabrication method of middle size LGP using continuous micro-lenses made by LIGA reflow, Korea-Australia Rheology Journal, November 2007, Vol. 19, No. 3, pp. 171-176, accessed (24.05.2008) at (<http://www.cheric.org/PDF/KARJ/KR19/KR19-3-0165.pdf>)
- [King, 2002] - King R. P., 2002-Introduction to Practical Fluid Flow, Butterworth-Heinemann, An imprint of Elsevier Science, ISBN: 0-7506-4885-6, Printed in Italy
- [Koshal, 1993] - Koshal Dal, 1993- Manufacturing Engineer's Reference Book, ISBN 0 7506 1154 5, Butterworth-Heinemann 1993, Oxford
- [Kruse, 2011] Kruse Wolfgang, 2011 - Quartzglass-Micropipettes, Thomas Recording GmbH- Giessen-Germany, accessed in (20.02.2011) at site (<http://www.thomasrecording.de/en/cms/upload/document/mmpip.pdf>)
- [Kundu, 2002] - Kundu Pijush K., Cohen Ira M., 2002 - Fluid Mechanics Second Edition, ISBN 0-12-1782514, Published by Academic Press
- [Kreith, 1999] - Kreith Frank, 1999 - Mechanical Engineering CRC Press LLC
- [Kutz, 1998] - KUTZ MYER, 1998 - Mechanical Engineers' Handbook Second Edition, ISBN 0-471-13007-9, John Wiley & Sons, Inc
- [Lai, 1999] -Lai Michael W., Rubin David, Krempl Erhard, 1999 - Introduction to Continuum Mechanics Third Edition, ISBN 0 7506 2894 4, Butterworth-Heinemann
- [Lee, 2007] - Lee Shau-Tarng, Park Chul B., Ramesh N.S., 2007 - Polymeric Foams Series, Science and Technology, ISBN 10: 0-8493-3075-0, Taylor & Francis Group
- [Lobontiu, 2005] - Lobontiu Nicolae, Garcia Ephrahim, 2005- Mechanics of Microelectromechanical Systems, Kluwer Academic Publishers,ISBN: 0-387-23037-8



- [Long, 2009] – Long Yu-Qiu, Chen Song, Long Zhi-Fei, 2009-Advanced Finite Element Method in Structural Engineering, Edited by Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, ISBN:978-3-642-00315-8
- [Macoso, 1994] – Macosko Christopher W., 1994-Rheology Principles, Measurements and Applications, Wiley-VCH, Inc., ISBN: 1-56081-579-5, Printed in United States of America.
- [Menges, 2000] - Menges Georg, Michaeli Walter, Mohren Paul, 2000 - How to Make Injection Molds Third Edition, ISBN: 3-446-21256-6, Hanser Publishers, Munich
- [Michaeli 2001] - Walter Michaeli, Helmut Greg, Gernot Kretzschmar, Frank Ehrig, 2001- Training in Injection Molding 2nd Edition, ISBN 3-446-21418-6, Carl Hanser Verlag, Munich
- [Miclăuş, 1975] - Miclăuş Ilie, Busuioc Dumitru, Iancou Titus, 1975-Album de matrice pentru materiale plastice, Editura Tehnică Bucureşti
- [Mildenberg, 1997] - Mildenberg Rolf, Collin Gerd, Zander Mechthild, 1997-Hydrocarbon Resins, ISBN 3-527-28617-9, VCH Verlagsgesellschaft mbH - A Wiley company publisher
- [Mikell, 2001] - Knights Mikell, 2001- Micromolding Sizing Up the Challenges,(26.09.2010) (<http://www.ptonline.com/articles/micromolding-sizing-up-the-challenges>)
- [Mikrotech, 2007]- Mikrotech, 2007 - Manufacturing, State-of-the-art Facility and Equipment, (<http://www.mikrotech.com/why-choose-mikrotech.html>)
- [M.I.Tech, 2007] - M.I.Tech, 2007-([www.M\\_I\\_Tech KOREA \\_ toward future.com](http://www.M_I_Tech_KOREA_toward_future.com)), accesed in (19.03.2008)
- [Moalli, 2001] - John Moalli, 2001 - Plastics Failure Analysis And Prevention, Plastics Design Library, ISBN 1-884207-92-8
- [Moguedet, 2007] - Moguedet M., Namy P. Béreaux Y., 2007 - On the Use of Comsol Multiphysics® to Understand and Optimize the Filling Phase in Injection and Micro-Injection Molding Process, Proceedings of the COMSOL Users Conference 2007 Grenoble, 27.11.09, ([http://www.comsol.com/papers/2544/download/Namy\\_1.pdf](http://www.comsol.com/papers/2544/download/Namy_1.pdf))
- [Moldflow\_a, 2010] – Autodesk Moldflow, 2010-Moldflow Mold Adviser, Analysis Capabilities ([www.moldflow.com](http://www.moldflow.com)), accesed (27.08.2010)
- [Moldflow\_b, 2010] – Autodesk Moldflow, 2010-Plastics Insight, Design Validation and Optimization ([www.moldflow.com](http://www.moldflow.com)), (27.08.2010)
- [Mould, 2008] (<http://mould-technology.blogspot.com/2008/05/runner-system-flowing-part-of-plastic.html>)
- [Nakayama, 1999] – Nakayama Y., Boucher R. F., 1999, Introduction to Fluid Mechanics, Butterworth-Heinemann, 1999, ISBN: 0-340-67649-3
- [NRC, 2007] - nrc-cnrc, National Research Council Canada, 2007-Powder Injection Moulding and Micromoulding: Net Shaping of Metallic and Ceramic Components for Biomedical Applications, accesed in (21.06.2008) at site (<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/facilities/imi/powder-injection.html>)
- [Oberg, 2008] - Oberg Erik, Jones Franklin D., Horton Holbrook L. , Ryffe Henry H. L, 2008 - Machinery's Handbook 28th Edition, ISBN 978-0-8311-2801-2, Industrial Press Inc., New York, USA
- [Osswald, 2006] - Osswald Tim A., Hernández-Ortiz Juan P., Polymer Processing Modeling and Simulation, ISBN-10: 3-446-40381-7, Carl Hanser Verlag, Munich
- [Pan, 2007] - Pan C T , Shiea J, Shen S C , 2007 - Fabrication of an integrated piezo-electric, micro-nebulizer for biochemical sample analysis, Journal of

- Micromechanics and Microengineering, Volume 17 ,Doi: 10.1088/0960-1317/17/3/031, IOP PUBLISHING (pp. 659), (<http://iopscience.iop.org/0960-1317/17/3/031>), accesed (15.09.2008)
- [Passino, 1998] - Passino Kevin M., Yurkovich Stephen, 1998-Fuzzy Control, Edited by Addison Wesley Longman, California, ISBN 0-201-18074-X
- [Perry, 1997] - Perry Robert H., Green Don W., Maloney James O., 1997- PERRY'S Chemical Engineers'Handbook, Seventh Edition, ISBN 0-07-115448-5., Edited by McGraw-Hill Companies, Inc
- [Piotter, 2006] - Piotter Volker, Gottwald Eric, Giselbrecht Stefan, Kreuzberger Stefan, 2006 - Micro-injection Moulding for the Manufacturing of Medical Devices, Medical Device Manufacturing & Technology 2006 accesed in (28.05.2009) from site (<http://www.touchbriefings.com/pdf/2079/Poitter.pdf> )
- [PMD, 2001] - Product and Mold Design- Product Design Mold Design, (<http://www.slideshare.net/guest341d0e/pc-mold-design-3302317>) (25.04. 2011)
- [Proxxon, 2010] - accesed in (04.07.2010) from (<http://www.proxxon.com/> )
- [Ratchev, 2008] - Ratchev Svetan, Turitto Michele, 2008 - Micro And Nanomanufacturing Strategic Research Agenda, University of Nottingham, (<http://www.minamwebportal.eu/downloads/MINAMdocuments/2008-01-12%20-%20MINAM%20SRA%2012%2001%2008.pdf>), accesed in (14.10.2009)
- [Rees, 2006] - Rees Herbert, Catoen Bruce, 2006 - Selecting Injection Molds Weighing Cost vs Productivity, ISBN-10: 3-446-40308-6, Carl Hanser Verlag
- [Riande, 2000] - Riande Evaristo, Diaz-Calleja Ricardo, Prolongo Margarita G., Masegosa Rosa M., Salom Catalina, 2000 - Polymer Viscoelasticity-Strees and Strain in Practice, printed in America at Marcel Dekker Inc at New York, distributed by Eastern Hemisphere in Basel Switzeland, ISBN 0-8247-7904-5, accesed from (<http://www.dekker.com>)
- [Rosato, 1997] - Rosato Dominick V., 1997 - Plastics Processing Data Handbook Second edition, ISBN 0 412 80190 6, Published by Chapman & Hall, London
- [Rosato, 1998]- Rosato D.V., 1998 - Extruding Plastics A practical processing handbook, ISBN-0-412-82810-3, Chapman&Hall, London
- [Rosato, 1999] - Rosato Donald V., Rosato Marlene G., Rosato Dominick V., 1999-Concise Encyclopedia Of Plastics, ISBN 0-7923-8496-2, Kluwer Academic Publishers Boston / Dordrecht / London, Printed in the United States of America
- [Rosato, 2000] - Rosato Domonick V., Rosato Donald V. , Rosato Marlene, 2000 - Injection molding handbook, Thirth Edition, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-8619-1
- [Rosato, 2001] - Rosato Donald V., Rosato Marlene G., Rosato Dominick V.,2000-Plastics Design Handbook, ISBN 0-7923-7980-2, Kluwer Academic Publishers Boston / Dordrecht / London, Printed in the United States of America
- [Rotar, 2008] **Rotar Daniel**, Cosma Cristian, Dume Adrian-Ilie, Seiculescu Valentin, Iclănzan Tudor, "Optimization Algorithm for Flow Plastics Materials in Case of Parts With Thin Walls Obtained by Microinjection Molding", Buletinul Științific al Universității Politehnica din Timișoara, Seria Mecanică, Fasc. 3, pp. 83-92 , 2008, ISSN 1224-6077
- [Rotar\_a, 2010] **Rotar Daniel**, Cosma Cristian, Stan Daniel, Seiculescu Valentin, Iclănzan Tudor, "The Methodology of Obtaining Micromold Cavity for Part Whith Thin Walls", Buletinul Științific al Universității Politehnica din Timișoara, Seria Mecanică, Fasc. 4, pp. 60-64, 2008, ISSN 1224-6077
- [Rotar\_b, 2010] **Rotar Daniel**, Cosma Cristian, Țuț Vlad, Șerban Iancu, "Rapid Prototyping for a Microinjection Molding Die", Selected Topics in Energy,

- Environment, Sustainable Development and Landscaping 6<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, EEESD'10, 3<sup>rd</sup> WSEAS Int. Conf. on Landsc. Architecture, LA'10, Politehnica University of Timisoara, Romania, pp 198-204, October 21-23, 2010, ISBN: 978-960-474-237-0.
- [RTP, 2011] (<http://www.rtpcompany.com/info/molding/design/2runner.htm>)
- [Rubinstein, 2003] - Rubinstein Michael, Colby Ralph H., 2003 - Polymer Physics, ISBN 10-0-19-852059-7, Oxford University Press
- [Ryntz, 2003] - Ryntz Rose A., Yaneff Philip V., 2003 - Polymers and Plastics, ISBN: 0-8247-08946, Marcel Dekker, Inc.
- [Sammoura, 2006] - Sammoura Firas, Kang JeongJin, Heo Young-Moo, Jung TaeSung and Lin Liwei, 2006 - Polymeric microneedle fabrication using a microinjection molding technique, *Microsystem Technologies*, Volume 13, Numbers 5-6, (pp.517-522), DOI: 10.1007/s00542-006-0204-1, Springer-Verlag, accessed (26.01.2009) at (<http://www.springerlink.com/content/p61x43408714645k/>)
- [Sawhey, 2007] - Sawhney G.S., 2007 - Fundamentals Of Biomedical Engineering, New Age International (P) Limited, Publishers, New Delhi, ISBN (13) :978-81-224-2549-9, 9
- [Saxena, 2005] - Saxena Anupam, Sahay Birendra, 2005- Computer Aided Engineering Design, Copublished by Springer, New York, USA with Anamaya Publishers, New Delhi, India, ISBN: 1-4020-2555-6 (HB), [www.springeronline.com](http://www.springeronline.com)
- [Semofs, 2010] - SEMOFS, 2010 - Publishable executive summary IST-FP6-016768, Ref.D0.2.2a-PAR\_M12-TUC Final.doc, ([http://www.semofs.com/fileadmin/user/pdf/publishable\\_executive\\_summary\\_M12.pdf](http://www.semofs.com/fileadmin/user/pdf/publishable_executive_summary_M12.pdf)), accessed at (25.11.2010)
- [Sha , 2005] - Sha B., Dimov S.S., Pham D.T., Griffiths C. A., 2005, Micro-injection moulding: Factors affecting the achievable aspect ratios, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 33, Numbers 1-2, pp 147-156, DOI: 10.1007/s00170-006-0579-2, accessed in (08.04.2009), to site (<http://www.springerlink.com/content/lq0m75l84n811u35/>)
- [Sheir, 2000] - Sheir L. L., Jarman R. A., Burstein G. T., 2000 - Corrosion Control Volume 2, ISBN 0-7506-1077-8, Butterworth-Heinemann
- [Shen, 2004] - Shen Y. K., Chien H. W., Yi Lin, 2004 - Optimization of the Micro-injection Molding Process using Grey Relational Analysis and MoldFlow Analysis, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 23, No. 17/2004, pp 1799-1814, DOI 10. 1177/0731684404041149 found at (<http://jrp.sagepub.com/cgi/content/abstract/23/17/1799>), accessed in 20.05.2010
- [Simpoe, 2010] - Introduction to Plastic Injection Molding simpoe ([www.simpoe.com](http://www.simpoe.com)), accessed in (27.09.2010)
- [Smallman, 1999] - Smallman R. E., Bishop R. J., 1999-Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering Sixth Edition, ISBN 0 7506 4564 4, Butterworth-Heinemann
- [Solin, 2006] - Solin Pavel, 2006, Partial Differential Equations and the Finite Element Method, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, ISBN:13-978-0-471-72070-6
- [Sperling, 2006] - Sperling L.H., 2006- Introduction To Physical Polymer Science, Fourth Edition, ISBN-13 978-0-471-70606-9, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey
- [springerlink, 2009] - (<http://www.springerlink.com/>), accessed (28.06.2009)
- [Stan, 2003] - Stan Daniel, 2003, Aplicatii ale ultrasunetelor in procesarea materialelor polimerice, Editura Politehnica Timisoara, ISBN 973-625-070-9

[Strobl, 2007] - Gert Strobl, 2007 - The Physics of Polymers Concepts for Understanding Their Structures and Behavior, ISBN 978-3-540-25278-8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

[Sun, 2006] - Sun Jianye, 2006 - Numerical Simulation of Liquid Crystalline Polymer Processing, Kochi University of Technology Kochi, Japan

[Șerban, 2011] Șerban Iancu, Stan Daniel, **Rotar Daniel** & Țuț Vlad, "Techniques to Obtain Different Molding Runners Dies used in Micro-Injection Molding", Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation ModTech 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, vol. 2, pp. 993 – 997, 25-27 May 2011, ISSN 2069-6736

[Șereș, 1996] Șereș Ioan, 1996- Injectarea materialelor termoplastice, Editura Imprimeriei De Vest, ISBN 973-97652-6-2,

[Șereș, 2001] Șereș Ioan, 2001- Materiale termoplastice pentru injectare. Tehnologie. Incercari. Editura Imprimeriei De Vest, Oradea

[Tong, 2002] - Liyong Tong, Adrian P. Mouritz, Michael K. Bannister, 2002, 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, ISBN 0-08-043938-1, Elsevier Science

[Turc, 2011] - Turc Cristian Gheorghe, Stef Dorian, Belgiu George & **Rotar Daniel**, "An Application of Fuzzy Logic Methodology For Workpieces Choosing", Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation ModTech 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, vol. 2, pp. 1109 – 1112, 25-27 May 2011, ISSN 2069-6736

[UMS, 2011] - UMS, 2011- In-line ultrasonic polymer process monitoring, Industrial Materials Institute, accessed in (09.03.2011) at site (<http://www.pacesimulations.com/download/brochures/ums-en.pdf>)

[Wegner, 2009] - Wegner Joanne L., Haddow James B., 2009- Elements of Continuum Mechanics and Thermodynamics, ISBN-13 978-0-521-86632-3, Cambridge University Press

[Wintermantel, 2009] - Wintermantel Erich, Ha Suk-Woo, 2009- Medizintechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-93935-1

[Yamaguchi, 2008] - Yamaguchi Hiroshi, 2008 - Engineering Fluid Mechanics, Springer Science+Business Media B.V., ISBN 978-1-4020-6742-6,

[Yuan, 2003] - Yuan S., Hung N. P., Ngoi B. K. A., Ali M. Y., 2003- Development of Microreplication Process—Micromolding, Materials And Manufacturing Processes, Vol. 18, No. 5, pp. 731–751, DOI: 10.1081/AMP-120024972, Marcel Dekker, Inc, at (<http://staff.iiu.edu.my/mmyali/MMP18%285%29731-751.pdf>) in (23.10.2010)

[Zhao, 2002] - Jianhong Zhao, Mayes Robert, Ge Chen, Seng Chan Poh, Hong Xie, Kay Juay Yang, Ravi N., 2002 - Micro Injection Moulding Process Technology Development, SIMTech Technical Report, Forming Technology Group, 04.12.2009 at (<http://www.simtech.a-star.edu.sg/Research/TechnicalReports/TR0485.pdf>),

[Zhang, 2002] - Xing Zhang, David J. Sanderson, 2002 - Numerical Modelling and Analysis of Fluid Flow and Deformation of Fractured Rock Masses, Elsevier Science ISBN: 0-08-043931-4,

[Zienkiewicz, 2000] - Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., 2000-The Finite Element Method, Fifth Edition, Vol.3. Fluid Dynamics, Butterworth-Heinemann, ISBN:0-7506-5050-8

Referințe bibliografice **Web**

- [Cordis] <http://cordis.europa.eu/brite-euram/home.html> (23.05.2009)
- [http\_01] <http://140.116.176.21/www/english/Laboratory%20Facility/instrument/Alignment.htm>
- [Sumitomo\_01] <http://www.sumitomo-shi-demag.eu/>
- [http\_02] [http://www.mat.ethz.ch/about\\_us/material\\_world/success\\_stories/bulk\\_metallic\\_glass](http://www.mat.ethz.ch/about_us/material_world/success_stories/bulk_metallic_glass) (14.02.2010)
- [Ptonline] <http://www.ptonline.com/articles/micromolding-sizing-up-the-challenges>
- [Patentstorm\_01] <http://www.patentstorm.us/patents/7132632/fulltext.html>
- [Directindustry] <http://www.directindustry.com/prod/nissei-plastic-industrial/vertical-injection-molding-machines-20434-45411.html> (01.09. 2010)
- [IKV] <http://www.ikv-aachen.de/> (11. 03.2009)
- [deepblue] <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/13913> (16.08.2009)
- [Aki] [http://www.aki.co.uk/insert\\_moulding](http://www.aki.co.uk/insert_moulding) (15.04. 2008)
- [Wiki] [http://en.wikipedia.org/wiki/Injection\\_molding](http://en.wikipedia.org/wiki/Injection_molding) (12.12.2010)
- [4m-net] <http://www.4m-net.org/KnowledgeBase/papers/PID367198> (03.07.2008)
- [Serpanalytics] <http://www.serpanalytics.com/site/matrexmold.com> (04.07.2009)
- [Patentstorm\_02] <http://www.patentstorm.us/patents/5925205/fulltext.html>
- [Ecs-umass] <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/injection/research.html>
- [Bergi-plast] <http://www.bergi-plast.de/Injection-Molding.109.0.html?&L=1>
- [Injection] <http://www.injection-moldings.com/plastic/micro-molding.php>
- [Babyplastusa] <http://www.babyplastusa.com/> (07.04.2008)
- [Sumitomo\_02] [http://www.sumitomo-shi-demag.eu/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Technologien\\_-\\_Download/TP\\_Micro-InjectionMoulding\\_gb.pdf](http://www.sumitomo-shi-demag.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/Technologien_-_Download/TP_Micro-InjectionMoulding_gb.pdf)
- [Microtool-plastic] <http://www.microtool-plastic.com/> (27.08.2009)
- [Biomems] [http://www.biomems.uc.edu/publications/fulltextarticle\\_recent/Disposable%20smart%20lab%20on%20a%20chip%20for%20point-of-care%20clinical%20diagnostics.pdf](http://www.biomems.uc.edu/publications/fulltextarticle_recent/Disposable%20smart%20lab%20on%20a%20chip%20for%20point-of-care%20clinical%20diagnostics.pdf) (29.05.2010)
- [Issinstitute] <http://issinstitute.org.au/wp-content/media/2011/05/ISS-FEL-REPORT-A-ROWNTREE-low-res.pdf>
- [Mikrotech] <http://www.mikrotech.com/micromanufacturing/micro-molding.html>
- [B2bdiecasting] <http://www.b2bdiecasting.com/plastic-injection/IM-1250.htm>
- [Eurekamagazine] <http://www.eurekamagazine.co.uk/Technology/Default.aspx>
- [Nrc-Cnrc] <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/facilities/imi/powder-injection.html>
- [Mema] [www.mema.ucl.ac.be/themesrech.html](http://www.mema.ucl.ac.be/themesrech.html) (09.11.2009)
- [Sci\_01] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606008661>
- [Sci\_02] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092534670600437X>
- [Paper] <http://www.paper.edu.cn/en> (12.03.2011)
- [Sandvik] <http://www.sandvik.coromant.com> (07.01.2011)
- [Berger] <http://www.berger-tools.co.uk> (12.07.2010)
- [Dormertools] <http://www.dormertools.com> (26.04.2011)
- [Emuge] <http://www.emuge.de> (25.08.2010)
- [Guehring] <http://www.guehring.de> (21.04.2011)
- [Imt-tools] <http://www.imt-tools.com> (07.03.2010)
- [Mikron] <http://www.mikron.com/tool> (09.05.2011)
- [Niagaracutter] <http://www.niagaracutter.com> (14. 07.2011)
- [Mastercam] <http://www.mastercam.co.uk> (28.01.2011)
- [Autodesk] <http://www.autodesk.com> (04.02. 2011)
- [Cadtech] <http://www.cadtech.pt> (17.05. 2011)

- [Cimatron] <http://www.cimatron.com> (19.03.2010)
- [Solidworks] <http://www.solidworks.com> (13.10.2009)
- [Delcam] <http://www.delcam.com> (06.09.2008)
- [Fanucge] <http://www.fanucge.com> (21.05.2009)
- [Magmasoft] <http://www.magmasoft.de> (25.10.2010)
- [Imold] <http://www.imold.com> (14.09.2009)
- [Moldex] <http://www.moldex3D.com> (16.06.2011)
- [Edgecam] <http://www.edgcam.com> (03.06.2009)
- [PTC] <http://www.ptc.com> (27.11.2008)
- [Sbmolde] <http://www.sbmolde.com> (17.05. 2009)
- [UGS] <http://www.ugs.com> (28.09.2010)
- [Siemens] <http://www.siemens.com> (20.01.2009)
- [Sigma-3d] <http://www.sigma-3d.com> (24.05.2011)
- [Simpatec] <http://www.simpatec.com> (17.04. 2010)
- [Vero-software] <http://www.vero-software.com> (05. 04. 2011)
- [Alcoa] <http://www.alcoa.com> (14. 06.2009)
- [Hasco] <http://www.hasco.com> (22.06.2008)
- [Meusburger] <http://www.meusburger.com> (07. 05.2010)
- [DME] <http://www.dme.net> (01.03.2010)
- [Micro-technica] <http://www.micro-technica.com> (18. 02.2010)
- [Zeiss] <http://www.zeiss.com/IMT> (09.12.2010)
- [Mitutoyo] <http://www.mitutoyo.de> (12.10.2009)
- [Renishaw] <http://www.renishaw.com> (21. 11.2008)
- [Cumsa] <http://www.cumsa.com> (15.02.2011)
- [I-mold] <http://www.i-mold.com> (06.01.2011)
- [Pedrotti] <http://www.pedrotti.it> (11.04. 2010)
- [Sideco-spa] <http://www.sideco-spa.it> (24.02.2011)
- [Ewikon] <http://www.ewikon.com>
- [Husky] <http://www.husky.ca> (17.05.2011)
- [Incoe] <http://www.incoe.de> (03.07.2011)
- [Mold-tool] <http://www.moldtool.com> (26.02.2011)
- [Runner-plast] <http://www.runner-plast.com> (11.09.2010)
- [Sise] <http://www.sise.fr> (08. 07.2010)
- [Sawi] <http://www.sawi.ch> (19.06.2011)
- [Thermoplay] <http://www.thermoplay.com> (30.01.2009)
- [Isel] <http://www.isel.com> (12. 12.2010)
- [Rhino3d] <http://www.rhino3d.com> (30. 06.2011)
- [Solidcam] <http://www.solidcam.com> (03.07.2010)