

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Ing. BULZAN FLORIN

**PROGRAMAREA SISTEMELOR
ROBOTIZATE ÎN TURNĂTORII PE BAZA
MODELULUI MATEMATIC AL PROCESULUI
TEHNOLOGIC**

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific

Prof. Dr.Ing.Dr.h.c.mult.KOVÁCS FRANCISC VILIAM

TIMIȘOARA
2006

UNIV. "POLITEHNICA"	
TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA CENTRALĂ	
Nr. volum	2006
Dulap	365
Lit.	E

Prefață

Problema majoră cu care se confruntă în prezent lumea științifică este aceea de a răspunde exigențelor unei societăți din ce în ce mai informatizată, în care dilema fiecărui sector de producție este de a fi " excelent " în performanțe de productivitate, calitate și adaptabilitate la cerințele pieței. Aceste imperative, aparent contradictorii, se pot realiza doar prin semnificative progrese în asimilarea conceptelor de automatizare și informatizare. Semnificative mutații survin și în planul tehnico-economice sau în plan social.

Până în ultimii ani, turnarea sub presiune a pieselor din aliaje neferoase a ținut mai mult de meșteșug decât de știință, implicând mai multe metode euristice (în general testează și elimină eroarea), chiar și în industriile dezvoltate. Problema majoră a proiectanților și a inginerilor tehnologi de fabricație este că fazele procesului de realizare a unui reper turnat (proiectarea procesului și procesul tehnologic însăși) sunt strâns intercorelate, poate mai evident decât în alte domenii industriale.

Apariția sistemelor CAD/CAM (CAD - Computer Aided Design, CAM – Computer Aided Manufacturing) și mai apoi a sistemelor CAE (Computer Aided Engineering) de simulare pe computer a eliminat multe din incertitudinile ce înconjurau procesul de realizare a unei piese turnate și a permis obținerea unor piese de calitate mai ridicată și în mod mai economic.

Pornind de la tema tezei " Programarea sistemelor robotizate în turnătorii pe baza modelului matematic al procesului tehnologic " autorul prezentei lucrări și-a propus realizarea următoarelor obiective principale:

- elaborarea unei legi de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune în conformitate cu procesul tehnologic de turnare sub presiune;
- modelarea matematică a procesului de turnare sub presiune;
- comanda pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și a unei axe de translație a unui robot.

Alegerea și formularea temei din prezenta teză de doctorat o datorez distinsului conducător de doctorat Prof. Dr. Ing. Dr. H. C. mult. Francisc Kovacs.

Un rol deosebit în perfecționarea mea pe parcursul elaborării cercetărilor și alegerii corecte a căii de urmat la avut schimburile de experiență, prin " Seminarul de Robotică ", inițiat și coordonat cu multă competență și profesionalism de către Prof. Dr. Ing. Dr. h. c. Francisc Kovacs.

Pentru competența deosebită, profesionalismul științific, pentru tactul abordat și răbdarea demonstrată de-a lungul stagiului (examene și referate) precum și în perioada de elaborare a prezentei teze, aduc calde mulțumiri, recunoștință și o aleasă considerațiune distinsului meu conducător de doctorat Prof. Dr. Ing. Dr. h. c. Francisc Kovacs.

Mulțumesc de asemenea tuturor participanților la " Seminarul de Robotică " , pentru sfaturile date, ajutorul acordat de la admiterea mea la doctorat și până la finalizarea tezei.

De asemenea doresc să adresez mulțumirile mele D-lor Profesori referenți științifici ai prezentei teze, pentru bunăvoința și răbdarea de a o parcurge și a face aprecierea ei, în vederea susținerii publice și de propunere de acordare a titlului științific de doctor în științe tehnice.

Și nu în ultimul rând țin să mulțumesc familiei mele pentru permanentele încurajări și răbdarea avută în această perioadă.

Ing. Bulzan Florin

Cuprins

Prefață

Cap1. Aliaje neferoase	5
1.1 Clasificare generală a aliajelor neferoase.....	5
1.2 Importanța structurii de solidificare a aliajelor neferose.....	6
1.3 Modificarea aliajelor AL – Si (siluminuri).....	7
1.4 Proprietăți fizice ale aliajelor topite	9
1.5 Proprietăți reologice.....	13
1.6 Comportarea reologică a aliajelor topite	14
1.6.1 Fluiditatea metalelor și aliajelor.....	14
1.6.2 Factorii principali care influențează fluiditatea.....	16
1.6.2.1 Influența proprietăților aliajului asupra fluidității.....	17
1.6.2.2 Influența temperaturii de turnare.....	21
1.6.2.3 Influența proprietăților termofizice ale aliajului.....	23
1.6.2.4 Influența vâscozității aliajului.....	25
1.6.2.5 Influența condițiilor de turnare asupra fluidității.....	26
2. Stadiul actual al tehnologiei turnării sub presiune	27
2.1 Principiul turnării sub presiune.....	27
2.2 Trepte de proces.....	30
2.2.1 Alimentarea cu aliaj topit.....	30
2.2.2 Umplerea matriței.....	31
2.2.3. Racirea (solidificarea) aliajului in matriță.....	41
2.2.3.1 Interacțiunea termică aliaj formă metalică	41
2.2.3.2 Influența presiunii asupra procesului de solidificare.....	45
2.2.3.3 Compactizarea (postpresarea).....	46
2.2.3.4 Răcirea piesei în matriță.....	47
2.2.4 Evacuarea (aruncarea) piesei din matriță.....	54
2.2.5 Timpul total al unui ciclu de turnare sub presiune.....	56
2.3 Exemple de tehnologii de obținere a pieselor turnate sub presiune.....	58
2.3.1 Tehnologie de obținere a unui mâner.....	58
2.3.2 Tehnologie de obținere a unei bușe.....	62
2.3.3 Tehnologie de obținere a unui capac suport.....	63
2.3.4 Tehnologie de obținere a unui suport corp iluminat.....	67
Cap.3 Echipamentul folosit în cadrul procesului de turnare sub presiune	71
3.1 Matrița.....	71
3.2 Mașini de turnat sub presiune.....	72
3.2.1 Mașini de turnat sub presiune cu piston.....	72
3.2.2 Mașini de turnat sub presiune cu compresor.....	73
3.2.3 Mașini cu cameră de presare rece.....	74
Cap.4 Optimizarea proiectării produselor din aliaje neferoase turnate sub presiune	78
4.1 Concepția constructivă și tehnologică.....	78
4.2 Defectele pieselor turnate sub presiune.....	84

4.3. Proiectarea optimă a produselor turnate sub presiune.....	86
4.4 Tehnologii de bază utilizate în procesul de proiectare al unei piese turnate sub presiune.....	89
4.5 Definierea modelului FEM al piesei turnate sub presiune.....	93
4.5.1 Introducere.....	93
4.5.2 Considerații tehnologice privind curgerea aliajului topit în matră. Tehnici de modelare computațională.....	94
4.6 Tehnici de discretizare cu elemente finite.....	97
4.6.1 Operații pregătitoare în vederea discretizării.....	97
4.6.2 Obținerea modelului de analiză a umplerii matriței prin discretizarea cavității de umplere în elemente finite tip shell.....	97
4.7 Analiza cu elemente finite.....	99
4.7.1 Ideile fundamentale ale Metodei Elementelor Finite.....	99
4.7.2 Scurt istoric.....	100
4.7.3 Tipuri de elemente finite.....	102
4.7.4 Aproximarea funcției necunoscute prin polinoame de interpolare.....	105
4.8 Funcții de interpolare liniare.....	105
4.9 Derivatele funcției de interpolare.....	110
4.10 Aplicații ingineresti ale metodei elementului finit.....	111
4.10.1 Generalități.....	111
4.10.2 Curgerea potențială a fluidelor incompresibile. Ecuația de continuitate...114	
4.11 Transmiterea căldurii în regim staționar. Echivalarea nodală pe baza calculului variațional.....	119
4.11.1 Transmiterea căldurii prin conducție și convecție.....	119
4.11.2 Ecuația de transmitere a căldurii prin conducție în regim staționar.....	121
4.11.3 Ecuațiile transmisiei căldurii privite ca o problemă variațională.....	123
4.11.4 Funcționala al cărei extrem descrie fenomenul de transmitere a căldurii.....	123
4.12 Exemplu de utilizare a metodei elementelor finite la calculul distribuției de temperaturi în cazul răcirii unei piese turnate.....	127
4.13 Optimizarea proiectării pieselor turnate sub presiune utilizând analiza CAE.....	142
4.13.1 Funcțiile unui sistem CAE utilizat la analiza pieselor turnate sub presiune.....	142
4.13.1.1 Funcția de estimare a procesului.....	142
4.13.1.2 Funcția de modelare.....	143
4.13.1.3 Funcția de vizualizare.....	144
4.13.1.4 Funcția de simulare a umplerii matriței.....	144
4.13.1.5 Funcția de simulare a proceselor post – umplere.....	145
4.13.1.6 Funcția de simulare a răcirii.....	146
4.13.1.7 Funcția de determinare a tensiunilor remanente.....	146
4.13.1.8 Funcția de determinare a contracțiilor și deformațiilor.....	147
Cap.5 Fabricație flexibilă în turnarea sub presiune.....	148
5.1 Generalități.....	148
5.2 Sisteme de alimentare cu aliaj topit.....	152
5.3 Evacuarea pieselor din matră utilizând roboți și manipolatoare.....	152
5.4 Sisteme de schimbare a matrițelor de turnat sub presiune.....	154
5.5 Sisteme de transport a pieselor turnate.....	157
5.6 Tipuri de roboți utilizați în sectoarele de turnare sub presiune.....	158

5.7 Modelul matematic al operației de turnare sub presiune.....	163
5.7.1 Modelul matematic al programului de manipulare al robotului.....	163
5.7.2 Elaborarea modelului matematic a mișcării pistonului mașinii de turnat sub presiune.....	165
5.8 Determinarea poziției pistonului în timpul procesului de turnare sub presiune.....	169
5.9 Funcțiile de comandă ale axelor de robot	172
5.10 Determinarea legii de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune, considerându-l ca o axă de robot, pe baza procesului tehnologic de turnare sub presiune.....	175
Cap. 6 Sisteme de acționare a roboților industriali	188
6.1 Introducere.....	188
6.2 Sisteme de acționare electrică a roboților industriali.....	190
6.2.1 Introducere	190
6.2.2 Acționarea electrică cu motoare de curent continuu (c.c.)	192
6.2.3 Acționarea cu motoare electrice de curent alternativ (c.a.)	192
6.2.4 Acționarea cu motoare electrice pas cu pas.....	192
6.3 Sisteme de acționare pneumatică a roboților industriali.....	194
6.3.1 Introducere	194
6.4 Sisteme de acționare hidraulice a roboților industriali.....	196
6.4.1 Introducere.....	196
6.4.2 Acționarea hidraulică secvențială.....	197
6.4.3 Sisteme de acționare electro-hidraulice.....	198
6.4.3.1 Introducere.....	198
6.4.3.2 Acționarea electro-hidraulică servocomandată analogic.....	202
6.4.3.3 Acționarea electro – hidraulică servocomandată digital (comandă numerică).....	203
Cap.7 Optimizarea acționărilor hidraulice ale roboților industriali.....	207
7.1 Introducere.....	207
7.2 Structura și organologia sistemelor hidraulice de acționare a roboților industriali.....	210
7.2.1 Introducere.....	210
7.2.2 Motoare hidraulice folosite în acționarea roboților industriali.....	211
7.2.3 Echipamente de distribuție (distribuitoare).....	212
7.2.3.1 Introducere.....	212
7.2.3.2 Servodistribuitoare.....	220
7.2.3.3 Distribuitoare proporționale.....	226
Cap. 8 Elaborarea unei metode de modelare pe calculator a acționărilor hidraulice și simularea funcționării pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de translație a unui robot.....	230
8.1 Prezentarea dispozitivului de injecție.....	230
8.2 Prezentarea structurii axei de translație orizontale pentru pistonul mașinii de turnat sub presiune.....	231
8.3 Schema de conducere a axei hidraulice de translație.....	232
8.4 Subsistemul de măsurare a deplasării relative a elementelor cuplelor cinematice conducătoare.....	234
8.5 Subsistemul de comandă.....	236

8.6 Subsistemul de contorizare și conversie A/D respectiv D/A.....	236
8.7 Modelarea matematică a acționărilor hidraulice ale cuplelor cinematice conducătoare ale roboților industriali.....	237
8.7.1 Introducere.....	237
8.7.2 Etapele modelării matematice a acționării axelor hidraulice.....	238
8.7.3 Modelul matematic al servosistemului electro-hidraulic cu comandă analogică.....	238
8.8 Stabilirea funcțiilor de transfer ale subsistemelor axei de translație.....	242
8.9 Simularea conducerii axei hidraulice de translație.....	246
Cap.9 Studiul diversilor factori asupra curgerii aliajului topit în cavitatea matriței în cazul turnării sub presiune.....	250
9.1 Studiul influenței poziției și formei geometrice a canalelor și a secțiunii de alimentare.....	250
9.2 Studiul influenței formei geometrice a cavității amprentă.....	253
9.3 Influența vitezei jetului la intrarea în cavitatea matriței prin secțiunea de alimentare.....	258
9.4 Influența numărului Re asupra umplerii cavității matriței.....	261
9.5 Analiza umplerii pentru diverse repere.....	262
Cap.10 Experimentări privind analiza umplerii cavității amprentă cu aliaj topit în cazul turnării sub presiune.....	268
10.1 Introducere.....	268
10.2 Metodica experimentelor.....	270
10.3 Concluzii în urma experimentului.....	272
Cap.11 Contribuții originale. Concluzii finale.....	273
11.1 Contribuții originale.....	273
11.1.1 Introducere.....	273
11.1.2 Contribuții în domeniul sistematizării informațiilor bibliografice.....	273
11.1.3 Contribuții în domeniul structurării procesului complex de realizare a pieselor turnate sub presiune din aliaje neferoase.....	274
11.1.4 Contribuții în domeniul aplicațiilor practice și industriale.....	275
11.1.5 Contribuții în domeniul cercetării experimentale.....	276
11.1.6 Direcții de cercetare viitoare.....	276
11.2 Concluzii finale.....	276
Cap.12 Bibliografie.....	278

CAPITOLUL 1.

Aliaje neferoase

1.1 Clasificare generală a aliajelor neferoase

Diversitatea mare de aliaje neferoase se clasifică după numeroase criterii, în primul rând după natura metalului de bază.

Principalele aliaje neferoase de importanță tehnică sunt aliajele de aluminiu și aliajele de cupru; în cantități substanțial mai mici se utilizează aliajele de magneziu, nichel, titan, zinc, plumb, staniu etc.

Un criteriu de importanță practică îl reprezintă clasificarea aliajelor neferoase după greutatea specifică figura 1:

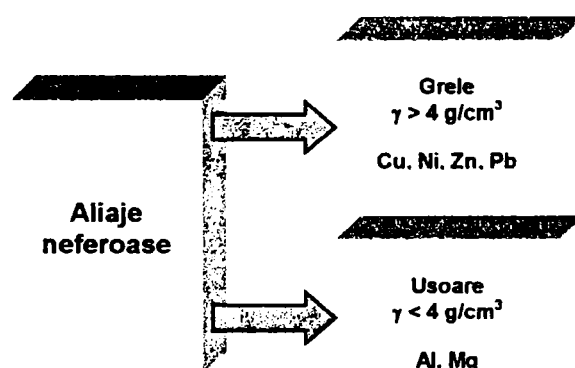


Fig. 1 Clasificarea aliajelor neferoase după greutatea specifică

Criteriul cel mai important din punct de vedere practic îl reprezintă clasificarea aliajelor neferoase după proprietățile de utilizare (mecanice, fizice, chimice).

Din punct de vedere al tehnologiei de prelucrare aliajele neferoase se grupează în:

- Aliaje deformabile plastic;
- Aliaje deformabile plastic și tratabile termic;
- Aliaje de turnare (eventual tratabile termic).

Acest ultim criteriu este cel mai direct legat de caracteristicile cu caracter fundamental, respectiv de constituția și microstructura aliajului.

Din punct de vedere al constituției de echilibru și al structurii primare de solidificare aliajele neferoase pot fi grupate în câteva categorii mari:

- aliaje monofazice constituite din cristale de soluție solidă având ca solvent metalul de bază și elementele de aliere. Din această categorie fac parte alamele α , aliajele cupru nichel simple sau aliate cu Zn de tip alpaca, sau cu Fe și Mn de tip metal Monel aliaje nichel – crom α de tip Chromel;
- aliaje multifazice ce conțin un amestec mecanic eutectic sau eutectoid și soluție solidă. Pentru exemplificare se menționează în această categorie aliajele hipoeutectice Zn – Al de tip Zamac (figura 2 a), aliajele Al – Si hipoeutectice și eutectice de tip silumin (figura 2b), bronzurile cu staniu hipoeutectoide $\alpha + \beta$.

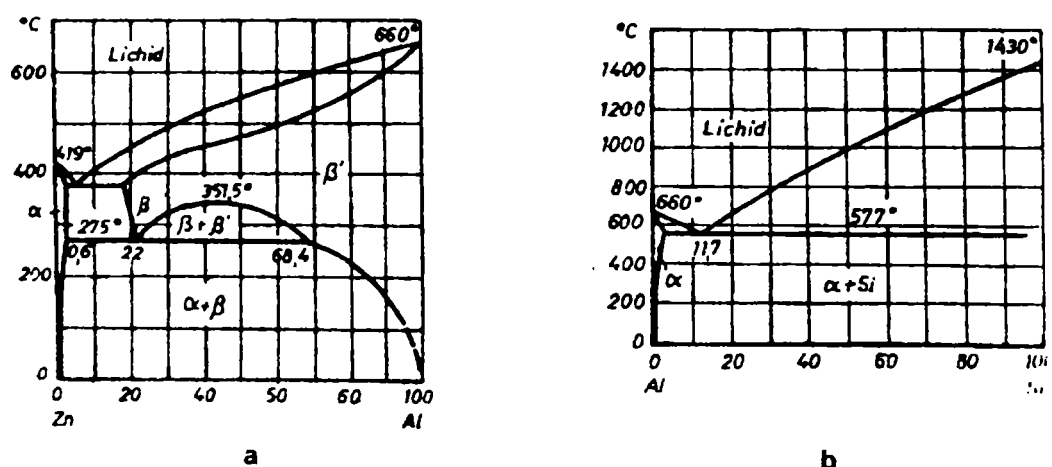


Fig. 2 Diagrama de echilibru fazic ale unor sisteme de aliaje neferoase conținând aliaje tehnice cu un amestec mecanic în microstructură.

- a) sistemul Zn – Al (aliaje hipoeutectice Zn – Al de tip zamak);
- b) sistemul Al – Si (aliaje hipoeutectice, eutectice și hipereutectice de tip silumin).

1.2 Importanța structurii de solidificare a aliajelor neferoase

Spre deosebire de oțeluri la care transformările alotropice ale fierului provoacă la răcire transformarea structurii primare de solidificare (structura austenitică) într-o structură secundară (ferito – cementitică) cu un grad avansat de dispersie a fazelor, în majoritatea aliajelor neferoase structura primară de solidificare se păstrează.

Metalele neferoase și aliajele lor au o tendință mult mai pronunțată decât oțelurile de a cristaliza cu granulație mare la solidificare. Rezultă că pentru aliajele neferoase

problema influențării proceselor de cristalizare în sensul obținerii în materialul turnat a unei granulații fine și a unui grad avansat de dispersie a fazelor condiționează în mod decisiv proprietățile de utilizare ale produsului metalic. Această influență este maximă pentru aliajele de turnare, dar se exercită în măsură considerabilă și în aliajele cărora li se aplică prelucrări ulterioare prin deformare plastică și tratament termic.

Modalitatea actuală cea mai eficace de influențare a caracteristicilor structurii primare o reprezintă modificarea prin care se înțelege procesul de schimbare a structurii metalului sau aliajului turnat sub influența unor micro adaosuri chimice introduse în topitură înaintea turnării acesteia (fără a schimba compoziția chimică).

1.3 Modificarea aliajelor Al – Si (siluminuri)

Siluminurile sau aliajele Al – Si sunt unele din cele mai importante aliaje neferoase de turnătorie, fapt datorat fluidității mari a topiturii metalice la compoziția eutectică (fig. 2b)

Siluminurile de compoziție apropiată de compoziția eutectică (11 – 13.5% Si – aliajele ATSi12, STAS 201/2 – 1980) sunt utilizate pe scară largă la turnarea pieselor cu configurație complexă (care trebuie să fie în același timp usoare și rezistente) datorită fluidității lor foarte bune.

În cazul siluminurilor proprietățile mecanice ale aliajului sunt influențate decisiv de caracteristicile microstructurale ale fazei nemetalice a eutecticului – siliciul.

Modificarea topiturii înaintea turnării schimbă radical aceste caracteristici microstructurale ale fazei nemetalice, influențând favorabil proprietățile mecanice ale aliajului.

În cazul siluminiului aplicarea modificării este esențială, întrucât aliajele nemodificate au proprietăți mecanice inferioare care le fac mai puțin utilizate tabelul 1.

Tab.1 Proprietățile mecanice pentru siluminii

Aliaj	Proprietăți mecanice	
	$\sigma_r [daN / mm^2]$	$\delta [\%]$
Siluminii eutectic 12%Si nemodificat	14	3
Siluminii eutectic 12%Si modificat cu 0.01%Na	25	14

Efectul modificării, de ridicare considerabilă a valorilor caracteristicilor mecanice ale siluminurilor, se datorește unor schimbări în mecanismul cristalizării, schimbări care produc modificări radicale în microstructură.

Microstructura siluminurilor nemodificate figura 3 se caracterizează prin prezența eutecticii ($\alpha + \text{Si}$) cu structură grosieră.

Eutecticul aliajelor nemodificate are o morfologie neregulată figura 3 cu plachete de Si distribuite întâmplător în masa de soluție solidă bogată în Al.

Modificatori eficienți pentru influențarea microstructurii eutecticii din siluminuri sunt metale superficial active Na și Sr, mai recent S, S+P etc [3].

Sodiul, utilizat ca principal modificador al siluminurilor, se introduce în topitură înaintea turnării sub formă de NaF, în amestec cu alte halogenuri (NaCl, KCl,) în proporții adecvate pentru ca amestecul de săruri (fluxul) să fie lichid la temperatura de efectuare a modificării.

Efectul optim de modificare se obține la un conținut de sodiu asimilat în topitură de 0.01 – 0.02%. la conținuturi mai mici de modificador se obțin structuri parțial modificate, iar la conținuturi mai mari se obțin structuri supramodificate.

În figura 4 este prezentată microstructura aliajelor hipereutectice modificate cu 0.01 % Na.



Fig.3 Microstructura aliajului eutectic Al+11.7%Si, nemodificat la turnare (siliciul formează cristale lungi distribuite larg și dezordonat în masa de soluție α a eutecticii)

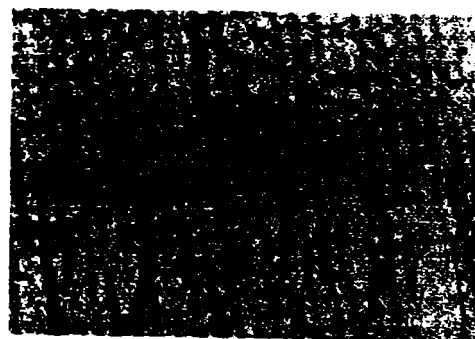


Fig.4 Microstructura aliajului hipereutectic Al+12.5% Si modificat cu 0.01% Na.

1.4. Proprietăți fizice ale aliajelor topite. Proprietăți termofizice ale metalelor și aliajelor

Prelucrarea aliajelor neferoase prin tumare sub presiune impune cunoașterea caracteristicilor lor fizice în legătură cu proprietățile implicate în procesul de prelucrare: schimbarea de stare, curgere. Cunoașterea proprietăților fizice ale aliajelor neferoase prelucrate prin tumare sub presiune este necesară deoarece regimul de lucru depinde de valorile caracteristicilor fizice. Valorile parametrilor de lucru ai unei mașini de tumat sub presiune (temperatura, presiune, viteză) depind de aliajul prelucrat caracterizat de proprietățile sale fizice. Din aceste motive este necesară cunoașterea proprietăților fizice (termice, reologice) ale aliajelor neferoase în stare solidă cât și în cea lichidă.

Proprietăți termofizice ale metalelor și aliajelor

Proprietățile termofizice ale metalelor și aliajelor sunt în strânsă legătură cu proprietățile de tumare precum și cu fenomenele fizico – chimice care au loc în timpul solidificării aliajului în formă.

Dintre proprietățile termofizice cele mai importante sunt: caracteristicile atomice, densitatea, căldura specifică, temperatura de topire, temperatura de fierbere, căldura latentă de topire, conductivitatea termică, conductivitatea electrică, coeficientul de difuzivitate termică, coeficientul de acumulare a căldurii.

□ **Caracteristicile atomice** (număr de ordine, masa atomică, volumul atomic) joacă un rol important la interpretarea științifică a unor fenomene ca: nucleația, cristalizarea, tensiunea superficială, difuzia etc.

În tabelul 2 sunt prezentate caracteristicile atomice a unor metale frecvent folosite în turnătorii.

Tab. 2 Caracteristicile atomice pentru diferite metale

Caracteristici	Elementul									
	C	Mg	Al	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
Număr atomic	6	12	13	25	26	28	29	30	50	82
Masa atomică	12	24.3	27	55	56	58.7	63.5	65.4	118.7	207.2
□ Densitatea ρ										
Volumul atomic	5.41	14	10	7.4	7.10	76.6	7.10	9.2	16.3	18.2

Interesul practic pe care îl prezintă densitatea este acela că permite calcularea masei unei piese turnate, atunci când se cunoaște volumul obținut prin simple măsurători geometrice.

Densitatea în stare lichidă este mai mică decât în stare solidă datorită faptului că în stare lichidă cresc distanțele interatomice (volumul specific crește cu temperatura).

Densitatea aliajelor poate fi calculată aproximativ, din densitatea metalelor componente după regula amestecurilor. Densitatea aliajelor în stare lichidă influențează tehnologia de turnare deoarece de ea depinde presiunea metalului lichid la umplerea formelor.

□ **Căldura specifică** (capacitatea calorică masică) și căldura latentă de cristalizare (topire) determină căldura necesară pentru topirea metalului și supraîncălzirea lui la temperatura de turnare.

Căldura specifică în stare solidă, poate fi calculată cu ajutorul legii lui Dulong și Petit. (căldura atomică a metalelor este constantă și egală cu 25.125 J/atom x gram = 6.0 cal/atom x gram) [S1].

$$c_{ps} = \frac{25.125}{A} \quad [\text{J/g K}] \quad (1)$$

în care : A – masa atomică.

Căldura specifică în stare lichidă poate fi calculată cu relația:

$$c_{pl} = \frac{29.94}{A} \quad [\text{J/kg K}] \quad (2)$$

și este cu circa 20% mai mare decât în stare solidă. [S1]

Căldura specifică pentru aliaje poate fi calculată din căldura specifică a metalelor componente după regula amestecurilor.

Căldura specifică prezintă importanță în sensul că metalele și aliajele cu căldura specifică mare (masa atomică mică) se răcesc mai puțin intens la curgerea prin canalele rețelei de turnare, deci posedă o capacitate de umplere (fluiditate) mai mare.

Odată cu mărirea temperaturii căldura specifică a aliajelor și metalelor crește.

Pentru metalele care stau la baza celor mai multe aliaje utilizate în turnătorii, căldura specifică la temperatura normală și în apropiere de temperatura de topire are valorile date în tabelul 3.

Tab. 3 Căldura specifică pentru diverse metale

Metalul de bază al aliajului	Zn	Mg	Al	Cu	Fe	Ti
Căldura specifică, în J/Kg K -la 20 ⁰	380	980	905	384	447	545
- în apropierea temperaturii de topire	460	1460	1420	545	875	-

Căldura de cristalizare pentru principalele metale care stau la baza aliajelor de turnătorie sunt prezentate în tabelul 4.

Tab. 4 Căldura de cristalizare pentru diverse metale

Metalul de bază al aliajului	Zn	Mg	Al	Cu	Fe	Ti
Căldura de cristalizare, kJ/kg	105	380	400	205	272	327

□ **Temperatura de topire.**

De temperatura de topire a diverselor aliaje depinde viteza cu care scade temperatura aliajului la turnare prin pierderea de căldura prin radiație, convecție și conducție deci durata posibilă de menținere a lui în stare lichidă.

□ **Conductivitatea termică λ**

Conductivitatea termică determină viteza de transmitere a căldurii printr-un corp în regim constant de temperatură și joacă un rol important și la transmiterea căldurii în regim variabil, alături de densitatea și căldura specifică a corpului.

Conductivitatea termică joacă un rol important la apariția tensiunilor de turnare. O conductivitate termică mică frânează egalizarea temperaturii între părțile groase și cele subțiri ale pieselor turnate sub presiune ceea ce conduce la contracții diferite și deci la apariția tensiunilor.

Conductivitatea termică depinde de natura aliajului, de compoziția chimică și de temperatură.

Odată cu creșterea temperaturii conductivitatea termică a metalelor, de obicei, se micșorează.

Pentru metalele care stau la baza aliajelor de turnătorie, conductivitatea termică la temperatura normală și la temperatura apropiată de cea de topire prezintă valori indicate în tabelul 5.

Tab.5 Conductivitatea termică a diverselor metale

Metalul de bază al aliajului	Zn	Mg	Al	Cu	Fe	Ti
Conductivitatea termică [W/m grad] - la 20°C	108	160	210	385	73	16
- în apropierea temperaturii de topire	92	145	419	328	29	-

□ **Coeficientul de difuzivitate termică (a) [S1]**

Este dat de relația:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (3)$$

în care: λ - conductivitatea termică, [W/mK];

ρ - densitatea [kg/m³];

c_p – căldura specifică masică la presiune constantă [J/kg K].

El caracterizează global modul de transmitere a căldurii într-un corp în funcție de caracteristicile metalului sau aliajului (λ, c_p, ρ).

□ **Coeficientul de acumulare a căldurii (b) [S1]**

Coeficientul de acumulare a căldurii este dat de relația:

$$b = \sqrt{\lambda \rho c_p} \quad [\text{Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}] \quad (4)$$

el caracterizează capacitatea metalului sau aliajului de a înmagazina și conduce căldura spre exterior.

În tabelul 6 sunt date proprietățile termofizice ale principalelor aliaje din turnătorie.

Tab.6 Proprietățile termofizice ale aliajelor de turnătorie

Aliaj	T [°C]	ρ [kg/m ³]	C _p [J/kgK]	λ [W/mK]
Oțel cu carbon scăzut	1530	7200	840	29
Oțel cu carbon mediu	1480... 1500	7200	750...800	29
Fontă cenușie	800... 1200	6600...7200	750...800	38...42
Aliaje de aluminiu	650	2600	1150	290
Aliaje de cupru	107	8700	500	290

1.5 Proprietăți reologice

Reologia – reprezintă studiul curgerii fluidelor sub acțiunea unor forțe și răspunsul acestora ca umare a aplicării acelor forțe.

□ Vâscozitatea

Vâscozitatea reprezintă proprietatea fluidelor de a se opune deformărilor (mișcărilor) care nu constituie reduceri ale volumului lor, prin dezvoltarea unor eforturi unitare. Această proprietate se manifestă numai la fluidele în mișcare și exprimă frecarea interioară dintre straturile de fluid care se deplasează cu viteze diferite.

În anumite situații este util să se folosească vâscozitatea cinematică

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{cm}^2/\text{sec}=1 \text{ st}] \quad (5)$$

în care: $\eta = g/cm \cdot \text{sec}$ vâscozitate dinamică;

$$\eta = A \frac{1}{V^{1/3}} e^{\frac{E}{VRT}} \quad (6)$$

unde: V – volum molar;

T – temperatura absolută;

E – energia de activare (80 . . . 120 kJ/g atom);

R – constanta lui Boltzmann;

A – masa atomică;

ρ densitate [kg/m³].

Vâscozitatea aliajelor depinde de vâscozitatea metalului de bază, precum și de compoziția, de puritatea și de temperatura lor.

În aliajele tehnice elementele pot micșora sau măria vâscozitatea în funcție de natura forțelor de legătură dintre atomi.

Influența elementelor asupra vâscozității se manifestă prin schimbarea densității și a temperaturii de cristalizare, conform relației (6).

Elementele care micșorează densitatea micșorează vâscozitatea (la temperatură constantă).

Vâscozitatea fluidelor este influențată de cîre temperatură, presiune și compoziție. Efectul presiunii asupra vâscozității metalelor și aliajelor lichide utilizate în turnătorie se consideră a fi foarte mic și practic nesemnificativ.

Influența temperaturii asupra vâscozității metalelor și aliajelor lichide arată că ea scade odată cu creșterea temperaturii.

Compoziția chimică influențează în mod deosebit vâscozitatea aliajelor lichide figura 5.

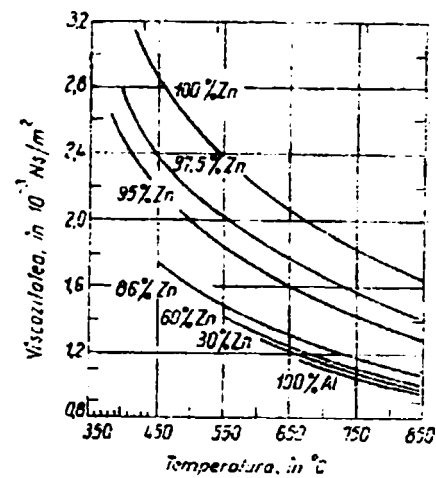


Fig.5 Vâscozitatea aliajelor lichide Zn-Al funcție de temperatură

1.6 Comportarea reologică a aliajelor topite

1.6.1 Fluiditatea metalelor și aliajelor

Fluiditatea este una dintre cele mai importante proprietăți de turnare (tehnologică) ale aliajelor lichide și este definită prin:

- capacitatea de curgere a aliajului prin canale și cavitățile forme, exprimată prin durata de umplere, viteza de curgere și lungimea canalelor și cavităților umplute;

- capacitatea de umplere corectă a cavității formei cu redarea celor mai fine detalii de configurație, exprimată prin precizia dimensională a pieselor turnate;
- capacitatea de eliminare în timpul curgerii a incluziunilor gazoase nemetalice din aliaj, exprimată prin compactitatea piesei turnate.

□ Determinarea fluidității

Se face cu ajutorul probelor tehnologice, care pot fi împărțite în trei grupe:

- probe care prezintă canale lungi cu secțiunea constantă, în care încetarea curgerii se datorește răcirii și cristalizării aliajului;

Mărimea fluidității este exprimată prin lungimea probei solidificate. Pentru turnarea probelor se folosesc forme cu un canal, drept, de tip spiral, de tip U figura 6.a,b,c.

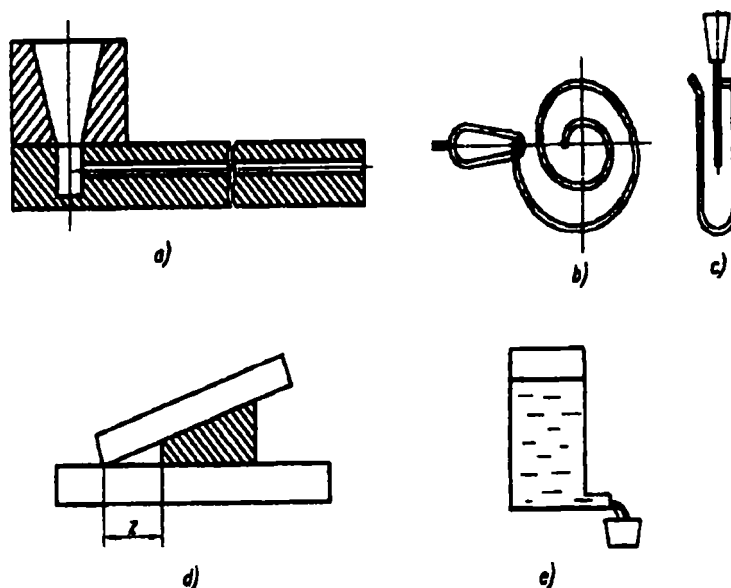


Fig.6 Principalele tipuri de metode folosite pentru determinarea fluidității aliajelor:

a) cu canal drept; b) spirală; c) tip U; d) tip pană; e) metoda bazată pe cântărirea metalului scurs.

- probe sub formă de canale cu secțiunea care se îngustează (variabilă). Încetarea curgerii aliajului poate fi cauzată de solidificare sau de acțiunea forțelor capilare (tensiune superficială), când aliajul este încă lichid. Fluiditatea se determină

prin dimensiunea secțiunii părții frontale a probei. Din această categorie fac parte probele tip pană figura 6.d.

- proba bazată pe încetarea curgerii aliajului datorită solidificării lui într-un canal de ieșire scurt și îngust. Mărima fluidității se exprimă prin masa aliajului care a curs de la începutul încercării și până la încetarea curgerii lui figura 6 e.

Determinarea fluidității cu ajutorul uneia sau mai multora din probele arătate prezintă importanță practică în umatoarele cazuri:

- pentru controlul capacității aliajului de a umple cavitatea formei, de exemplu la tumarea pieselor cu pereți subțiri sau cu lungime mare;
- pentru controlul temperaturii aliajului la o compozitie chimica data;
- pentru controlul calitativ al compoziției chimice a aliajului, a variațiilor acestei compoziții în timpul elaborării, în condițiile menținerii constante a temperaturii de tumare.

Determinarea fluidității este obligatorie în cazul asimilării de noi aliaje pentru tumarea pieselor.

1.6.2 Factorii principali care influențează fluiditatea

Fluiditatea aliajelor este o proprietate tehnologică și ca atare este influențată de mulți factori. Dintre aceștia mai importanți sunt următorii:

- proprietățile intrinseci ale aliajului: proprietățile fizice, chimice și metalurgice ca de exemplu: intervalul de solidificare și modul de cristalizare; temperatura de tumare; căldura specifică, căldura latentă de cristalizare (topire), conductivitatea termică, vâscozitatea, tensiunea superficială, puritatea aliajului (conținutul de gaze, incluziuni);

- proprietățile materialului formei: mai ales cele termofizice (conductivitatea termică, difuzivitatea termică);

- condiții de tumare: geometria cavității formei, presiunea hidrostatică, eventual presiunea exterioară aplicată la tumare, care determină viteza de curgere a aliajului.

Toți acești factori influențează interacțiune termică, mecanică și chimică care are loc permanent între aliajul care curge și pereții formei, cu care vine în contact și care determină capacitatea de curgere a aliajului.

Aprecierea corectă a influenței unui factor asupra fluidității aliajului se poate face numai în condițiile în care valoarea celorlalți factori este menținută constantă.

1.6.2.1 Influența proprietăților aliajului asupra fluidității

Dintre proprietățile aliajului o influență mare asupra fluidității are *intervalul de solidificare*, definit ca $\Delta T = T_L - T_S$ [°C] în care: T_L – temperatura lichidus, T_S – temperatura solidus.

Aliajul este capabil să curgă atât timp cât se găsește în stare lichidă, precum și o perioadă când el se găsește în curs de solidificare (în stare semilichidă). Temperatura la care încetează curgerea (când fluiditatea este zero) se găsește în intervalul de solidificare; corespunzătoare unei cantități de 20- 30% cristale din greutatea aliajului figura 7. Aliajul reprezintă o suspensie.

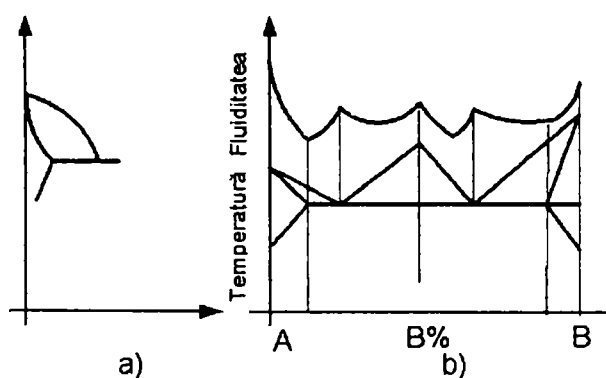


Fig.7 Intervalul de temperatură în care aliajul curge (a) și corelația dintre diagrama de echilibru și fluiditate (b)

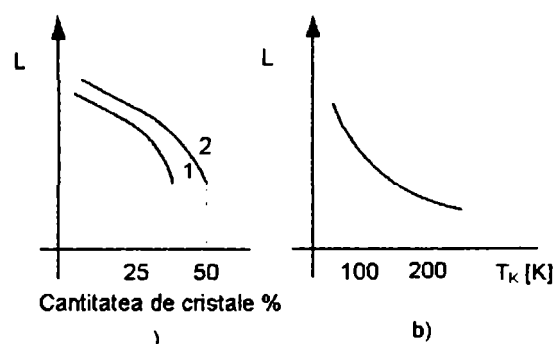


Fig.8 Influența cantității și formei cristalelor (a) și a intervalului de solidificare (b) asupra fluidității aliajelor;

1 – dendrite ramificate; 2 – cristale sferice.

Fluiditatea aliajului în intervalul de solidificare este cu atât mai mică cu cât proporția de cristale este mai mare și cu cât suprafața lor specifică este mai mare (raportul dintre suprafață și volum), adică cu cât dendritele sunt mai dezvoltate figura 8 a.

Aliajele, care au cristalitele cu suprafață specifică mică, compacte (de exemplu sferice) au fluiditatea mai mare, iar fluiditatea zero apare la cantități mai mari de cristalite (30-40%) în topitură [S1].

Metalele pure, aliajele eutectice și compușii chimici cristalizează la temperaturi constante, cu formare de cristalite cu compoziție constantă. În aceste condiții, cristalitul se poate alimenta în mod uniform în toate direcțiile. Ca urmare cristalitele prezintă aceleași dimensiuni în toate direcțiile (sunt cristalite echiaxiale) sau se obțin sub formă de dendrite slab ramificate, groase, din care se constituie crusta solidificată compactă. Aceasta se deplasează succesiv de la suprafața de contact metal – formă spre interiorul cavității formei umplute cu aliaj lichid. În fiecare moment există o suprafață relativ netedă între crusta solidificată și miezul lichid. În aceste condiții, aliajul lichid cuprins între crustele solidificate poate curge ușor figura 9. din acest motiv, fluiditatea metalelor pure, compușilor chimici și aliajelor eutectice este maximă figura 7b, față de celelalte componente chimice ale aliajului.

La aliajele cu interval de solidificare, cristallizarea începe prin formarea soluțiilor solide, cristalitele cresc într-un interval de temperatură, în condițiile variației compoziției chimice și a apariției segregăției dendritice.

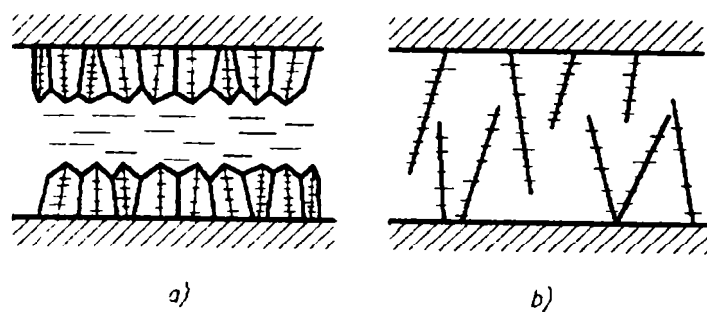


Fig.9 Modul de solidificare a metalelor și aliajelor la temperatura constantă (a) și în interval de temperatură (b).

Ca urmare ele cresc de preferință într-o anumită direcție, obținându-se dendrite ramificate.

Cristalitele dendritice ajung ușor în contact unele cu altele formând un schelet continuu, iar în cazul în care aderă la pereții formeii sau ai crustei, lasă la interior un canal cu pereții ruгоși, cu unele cristalite dezvoltate mult spre axul secțiunii piesei frânând capacitatea de curgere figura 9b.

Mecanismul curgerii metalelor lichide, cu interval de solidificare conform modelului din figura 9 b, poate avea loc numai în cazul vitezelor mici de deplasare (de exemplu, în condițiile alimentării piesei cu metal lichid din masele). În cazul curgerii aliajelor prin canale, cristalitele dendritice se rup și sunt antrenate de curent, contribuind astfel la formarea unui sistem vâcos care încetează repede să mai curgă figura 10.

Cu cât cristalitele sunt în cantitate mai mare și mai dezvoltate, perpendicular pe direcția curentului, cu atât ele se vor rupe mai ușor și vor bloca mai repede curgerea. Acest lucru se intensifică odată cu creșterea intervalului de solidificare. Așa deci:

- Fluiditatea aliajelor cu interval de solidificare este determinată de particularitățile structurii amestecului de fază lichidă și solidă.
- Fluiditatea metalelor și aliajelor care se solidifică la temperatura constantă este influențată de proprietățile suprafeței canalului de curgere și capacitatea metalului de a curge la această temperatură.

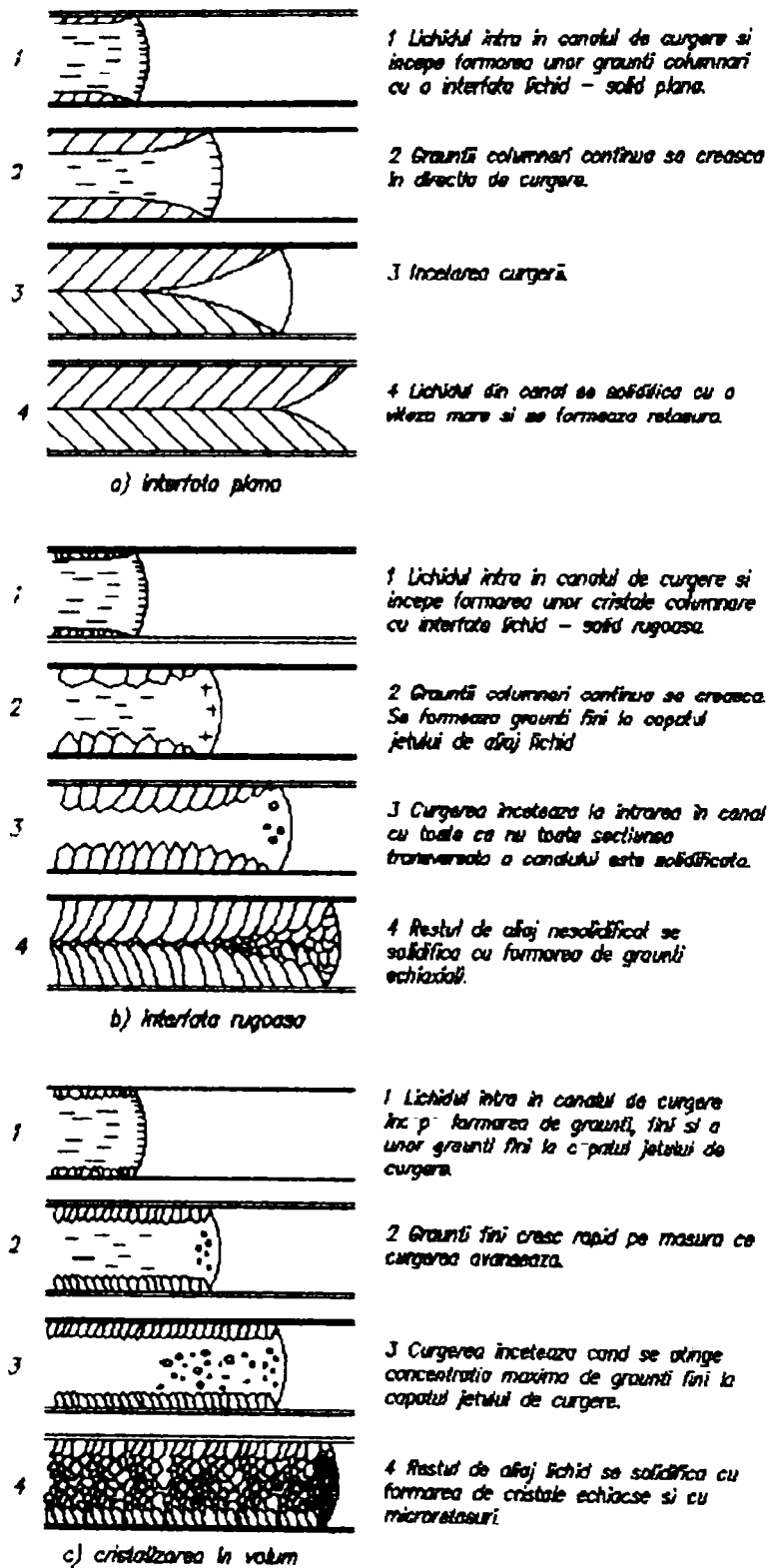


Fig.10 Mecanismul curgerii prin canale a metalelor pure (a) și aliajelor cu interval de solidificare (b,c), turnate la temperatura lichidus.

1.6.2.2. Influența temperaturii de turnare

Aliajul în procesul de curgere pierde căldura treptat, se răcește, în timp ce forma asimilează căldură (se încălzește).

Pierderile de căldură, până la temperatura turnării nu trebuie să depășească căldura de supraîncălzire Q_s , consumată pentru încălzirea aliajului, deasupra temperaturii fluidității zero:

$$Q_s = M [c(T_t - T_{f0}) + xL] \quad [\text{kJ/kg}] \quad (7)$$

în care:

M – masa aliajului lichid, necesar pentru obținerea piesei [kg];

c - căldura specifică a aliajului în stare lichidă [kJ/kg °C];

L – căldura de cristalizare [kJ/kg]

x – proporția de fază solidă în aliaj corespunzătoare fluidității zero;

T_t – temperatura de turnare [K];

T_{f0} - temperatura fluidității zero [K].

Cu creșterea temperaturii de turnare, crește și valoarea cantității de căldură constantă în aliaj și ca urmare, aceasta se va găsi în stare de curgere o perioadă de timp mai mare, și, deci fluiditatea va fi mai mare.

Influența naturii aliajelor asupra fluidității poate fi apreciată numai în cazul când gradul de supraîncălzire deasupra temperaturii de fluiditate zero este menținută constantă, diversele aliaje fiind turnate la temperaturi diferite figura 11a. În acest caz se determină fluiditatea reală a aliajului.

Deși fluiditatea reală caracterizează cel mai bine capacitatea de curgere a aliajelor, ea are o importanță practică mică deoarece curba de fluiditate zero este greu de stabilit cu precizie.

Din acest motiv, pentru compararea aliajelor din anumite sisteme, din punctul de vedere al fluidității, acestea se toarnă la aceeași temperatură, deci la grade diferite de supraîncălziri figura 11b.

În acest fel se determină fluiditatea practică, mărimea care reflectă atât influența supraîncălzirii, cât și a intervalului de solidificare.

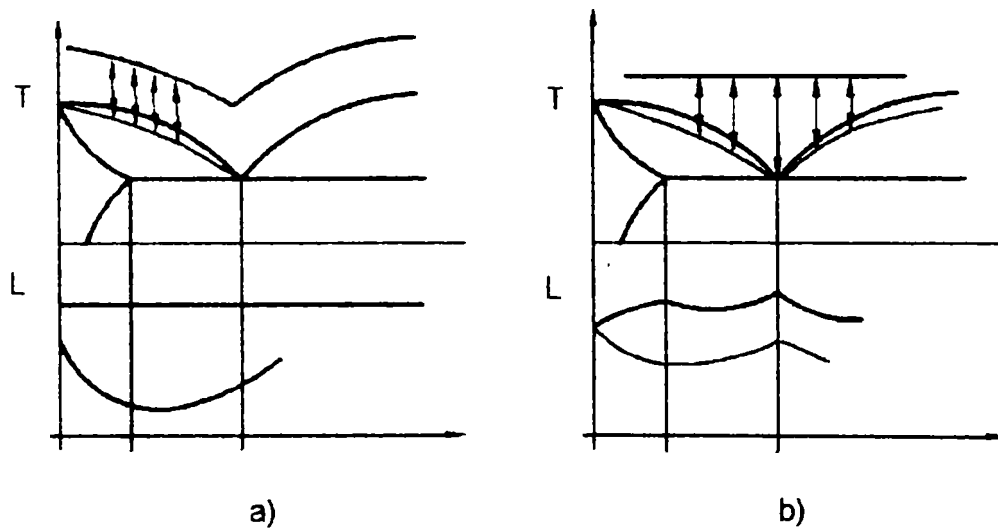


Fig.11 Influența temperaturii de turnare asupra fluidității aliajelor: a) fluiditatea reală; b) – fluiditatea practică.

De regulă, influența supraîncălzirii asupra fluidității este mai puternică decât cea a intervalului solidificare.

Așa se explică de ce fluiditatea practică a aliajelor cu interval mare de solidificare este mai ridicată decât cea a metalelor pure, întrucât au $\Delta T = T_t - T_L$ (T_t – temperatura de turnare, T_L – temperatura lichidus) mult mai mare.

În cazul aliajelor apropiate de punctul eutectic (se micșorează intervalul de solidificare și crește gradul de supraîncălzire) fluiditatea se mărește mult.

În vederea măririi fluidității aliajelor ridicarea temperaturii de turnare este un mijloc folosit frecvent în turnătorii, deoarece schimbarea compoziției chimice, practic, nu se poate face, având în vedere că, de compoziția chimică depind structura și proprietățile mecanice ale piesei turnate

1.6.2.3. Influența proprietăților termofizice ale aliajului.

În afara gradului de supraîncălzire ($T_t - T_{\text{li}}$), conținutul de căldură al aliajului este influențat de căldura specifică și de căldura latentă de cristalizare.

Viteza de răcire a aliajului în formă este influențată și de valoarea conductivității termice.

Cu cât căldura specifică și greutatea specifică a aliajului sunt mai mari, cu atât va fi mai ridicată scăderea temperaturii.

Conductivitatea termică ridicată a aliajului micșorează fluiditatea, întrucât favorizează transmiterea intensă a căldurii din interiorul stratului de aliaj lichid spre pereții formei; temperatura aliajului scade mai mult în timpul curgerii.

Aliajele cu un coeficient mare de difuzivitate termică pierd mai repede temperatura în contact cu pereții formei și fluiditatea lor scade. Aliajul cu un coeficient mic de difuzivitate termică își păstrează mai mult timp temperatura, deci fluiditatea.

Căldura latentă de cristalizare (topire) influențează fluiditatea în sensul că cantitatea mare de caldură eliberată la formarea primelor cristale în cursul curgerii contribuie la menținerea temperaturii, deci a fluidității.

Căldura latentă de cristalizare L , (de topire), influențează mărimea entropiei procesului de topire (E):

$$E = \frac{L \cdot A}{T} = 9.2 \quad [\text{kg} / \text{kmol} \cdot \text{K}] \quad (8)$$

în care : T – temperatura de topire [K];

A – masa atomică.

Entropia ridicată indică un grad de ordonare mai mare a structurii.

În funcție de valoarea căldurii specifice și a căldurii latente de cristalizare se determină căldura necesară de topire, iar la răcire – viteza de răcire.

Căldura specifică de cristalizare raportată la unitatea de volum reprezintă 85 – 90% din conținutul de căldură, raportat la același volum.

Căldura de cristalizare joacă un rol important în cea ce privește fluiditatea în cazul proceselor de alimentare cu aliaj lichid a diferitelor porțiuni din pereții piesei, în curs de solidificare (de exemplu curgerea fazei lichide prin dendrite).

Independent de modul de turnare (cu supraîncălzire sau temperatura de turnare constantă), fluiditatea aliajelor Al – Si continuă să crească în domeniul hipereutectic, deci se separă faza primară figura 12.

1.6.2.4. Influența vâscozității aliajului

Modul de curgere a aliajului depinde de vâscozitatea lui dinamică și de greutatea lui specifică și este reflectat de valoarea vâscozității cinematice ν (2.5)

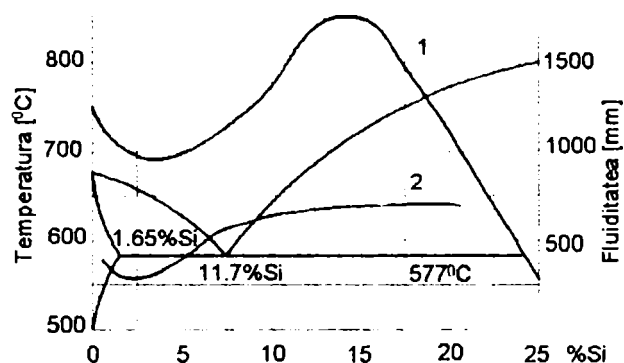


Fig.12 Variația fluidității la aliajele Al – Si ;
1 – cu supraîncălzire; 2 – temperatura de turnare constantă

Vâscozitatea cinematică intră în expresia criteriului adimensional – numărul lui Reynolds (Re):

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (9)$$

în care: v – viteza de curgere liniară [m/s];

d – diametrul hidraulic (raportul dintre suprafața secțiunii transversale a canalului și perimetrul secțiunii în cm.

Pentru aliaje s-a stabilit că la valori $Re < 2500$ curgerea este laminară, caracterizată prin viteze diferite ale particulelor fluide pe secțiunea curentului figura 13. La valori $Re > 3000$, curgerea devine turbulentă, caracterizată prin viteze aproximativ egale pe întreaga secțiune a jetului figura 13.b.

Influența vâscozității asupra fluidității se manifestă prin aceea că vâscozitatea determină viteza de curgere laminară (viteza de umplere a formei) și de ridicare la suprafață a incluziunilor de gaz.

Vâscozitatea poate influența viteza de curgere (umplere) a aliajului numai în cazul curgerii laminare, când frecările interioare joacă un rol important figura 13c. acest lucru are loc la turnarea pieselor cu pereți groși, precum și în etapa finală a procesului de curgere (când vâscozitatea η crește foarte mult).

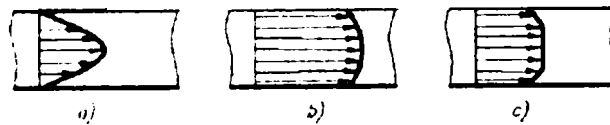


Fig.13 Curgerea laminară (a) și turbulentă (b) a aliajelor

1.6.2.5. Influența condițiilor de turnare asupra fluidității

Prin condiții de turnare se înțeleg: configurația (geometria) cavității prin care curge aliajul, viteza de umplere, presiunea exercitată asupra aliajului în curgere etc.

În legătură cu configurația cavității piesei, o influență deosebit de mare asupra fluidității (capacității de umplere) care este raportul dintre suprafața totală de răcire a piesei și volumul ei:

$$R = \frac{V}{F} \quad [m] \quad (10)$$

Atunci când piesa are o suprafață de răcire mare, la același volum, deci un R mic, metalul transmite formei, în unitatea de timp, o cantitate mare de căldură: cristalizarea începe mai devreme și capacitatea de curgere, exprimată prin fluiditate, se micșorează.

Prin urmare, în timpul umplerii cavității formei se mărește temperatura de turnare a metalului figura 14.

Cu cât viteza de umplere a formei este mai mare cu atât pierderea de căldură și răcirii formei va fi mai mică, cu atât se menține mai ridicată temperatura aliajului și fluiditatea lui.

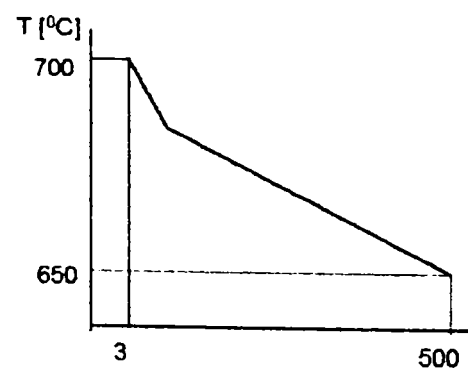


Fig.14 Interdependența dintre grosimea peretelui piesei și temperatura de turnare.

Stadiul actual al tehnologiei turnării sub presiune

2.1 Principiul turnării sub presiune

Turnarea sub presiune mecanică se obține prin utilizarea forței unui piston 1. În cazul propriuzis al turnării sub presiune, pistonul acționează asupra aliajului lichid 2 sau în stare păstoasă, într-o cameră de compresie 3 forțându-l să treacă printr-o duză de injectare 4 la care este racordată etanș forma metalică 5 (matrița); specific procedeului este curgerea aliajului sub presiune, prin injectare, și, deci existența unei rețele de turnare în forma metalică, prin care cavitatea amprentă 6 este umplută cu aliaj.

Procesul de turnare sub presiune se realizează pe mașini speciale. În cazul mașinilor moderne se folosesc camere de compresie reci, izolate de agregatul de topire; metalul se toamă în ele la executarea fiecărei operații de turnare. În figurile 15 și 16 sunt reprezentate schemele procedeului de turnare sub presiune la mașinile cu cameră de compresie verticală, respectiv orizontală.

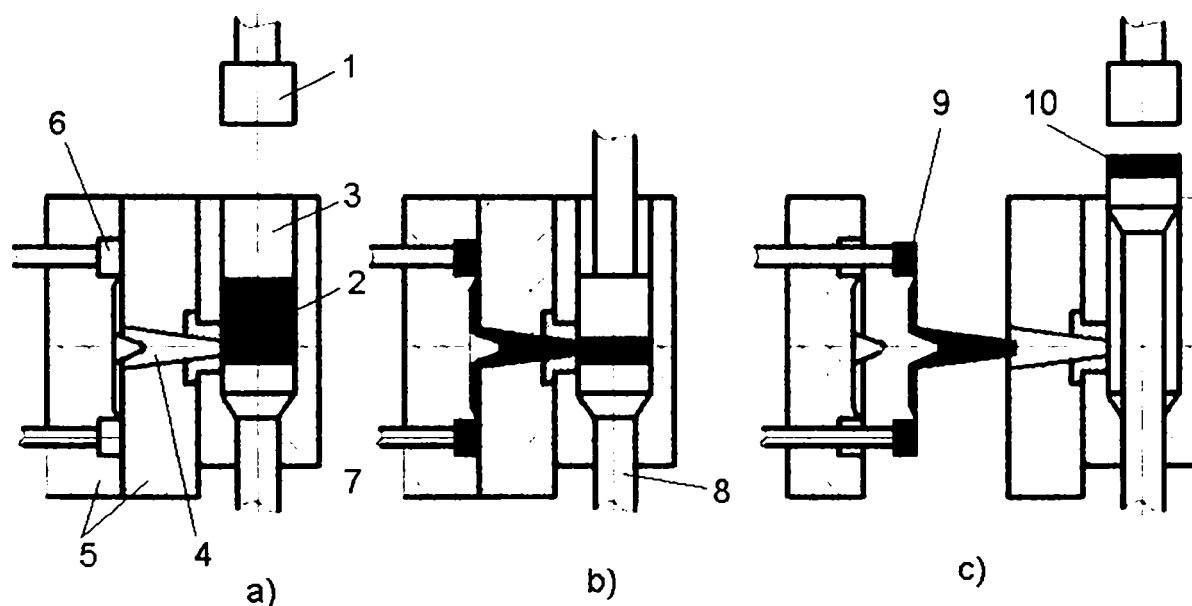


Fig.15 Schema de principiu a procesului de turnare sub presiune pe mașina cu cameră de compresie verticală. a) umplerea cavității cu aliaj; b) presarea și formarea piesei; c) extragerea piesei
1- piston; 2- aliaj lichid; 3- camera de compresie; 4- duza de injectare; 5- matrița; 6- cavitatea amprentă; 7- extractor; 8- piston inferior; 9- piesa finită cu rețeaua de turnare; 10- adaosul tehnologic.

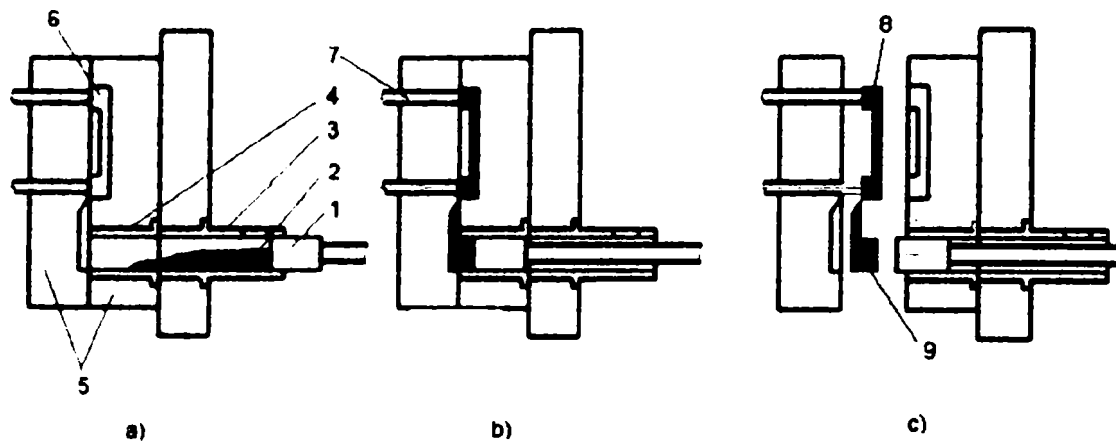


Fig.16 Schema de principiu a procesului de turnare sub presiune pe mașina cu cameră de compresie orizontală. a) umplerea camerei de compresie cu aliaj; b) presarea și formarea piesei; c) extragerea piesei.
 1- piston, 2- aliaj lichid, 3- camera de compresie; 4- duza de injectare; 5- matrița; 6- cavitatea amprentă;
 7- extractor, 8- piesa finită cu rețeaua de tumare; 9- adaosul tehnologic.

Procesul de tumare sub presiune este un fenomen ciclic, fiecare ciclu fiind format din mai multe operații. Realizarea unei piese tumate sub presiune presupune următoarele operații:

- închiderea matriței;
- alimentarea cu aliaj topit;
- introducerea aliajului topit sub presiune în matriță;
- răcirea (solidificarea) aliajului sub presiune în matriță;
- deschiderea matriței;
- extragerea piesei tumate din matriță.

Simplificat, realizarea prin tumare sub presiune a unei piese poate fi urmărită în figura 17 pentru tumarea pe mașina cu cameră de compresie orizontală. Aliajul topit este introdus în camera de compresie 5. Metalul topit este împins sub presiune în matrița 2 de către pistonul 6, ca urmare a presiunii exercitate de cilindrul de presare 7.

După răcire și solidificarea materialului în matriță, platoul mobil 1 al mașinii de tumat sub presiune se îndepărtează de platoul fix 3. Astfel masina se deschide și ca urmare a acționării sistemului de scoatere din matriță, piesa tumată 10 este aruncată din matriță.

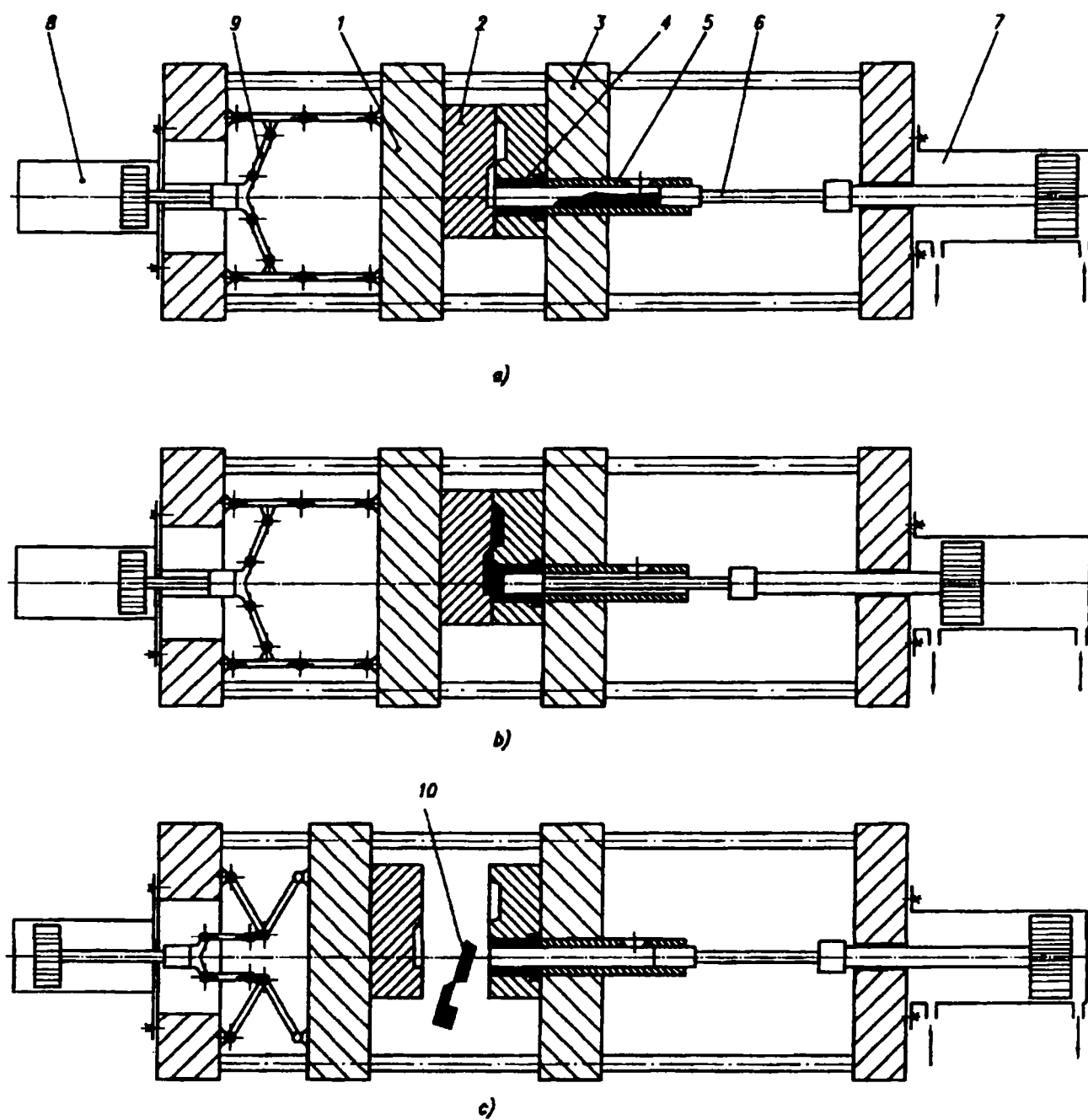


Fig.17 Schema de principiu a turnării sub presiune;

a) umplerea cavității cu aliaj; b) presarea și solidificarea metalului; c) extragerea piesei. 1 – platou mobil; 2 – matriță; 3 –platou fix; 4 – duza mașinii; 5 – camera de compresie; 6 – piston plonjor; 7 – cilindru de presare; 8- cilindru de deplasare a semiformei; 9 – brațele pârghiilor; 10 – piesa turnată.

2.2 Trepte de proces

Turnarea sub presiune este un proces ciclic care cuprinde operații care nu sunt perfect delimitate. Reprezentând grafic mișcarea pistonului și a matriței în cursul procesului de turnare sub presiune se obține diagrama din figura 18.

Întreg procesul de turnare sub presiune poate fi cuprins în următoarele trepte de proces:

- alimentare;
- umplere matriță;
- răcire în matriță (solidificare, compactizare)
- evacuare piesă din matriță.

2.2.1 Alimentarea cu aliaj topit

În treapta de proces alimentare se creează premisele pentru treapta de proces umplere matriță.

În treapta de proces alimentare se realizează dozarea aliajului topit în conformitate cu volumul cavității matriței astfel încât să poată fi umplută în întregime.

• Treapta de proces “alimentare”

Treapta de proces alimentare cuprinde umplerea cu aliaj topit a oalei de turnare prin imersarea acesteia în baia metalică, aducerea oalei în dreptul orificiului de alimentare din camera de compresie.

Pentru alimentare se definesc următoarele limite:

- început: imersarea oalei de turnare în baia metalică;

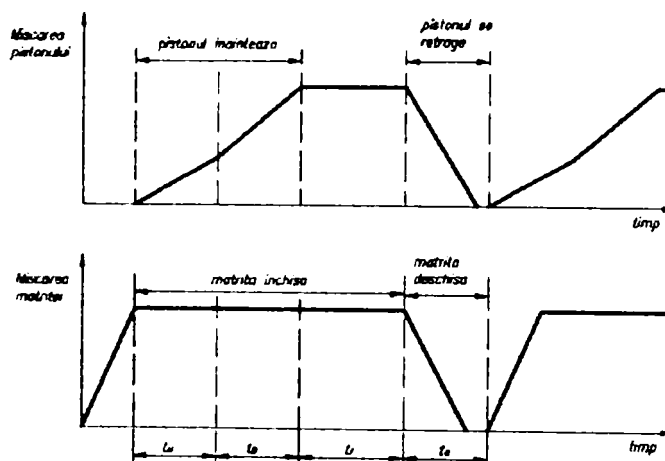


Fig.18 Diagrama reprezentând deplasarea pistonului și a matriței în procesul de turnare sub presiune;
 t_u – timp de umplere matriță; t_p – timp de presare a metalului în formă; t_r – timp de răcire; t_e – timp de evacuare a piesei

- sfârșit: terminarea golirii conținutului de metal topit din oala de turnare, concomitent începe mișcarea pistonului din cadrul procesului umplere matriță.

Durata procesului se caracterizează prin timpul de alimentare t_a .

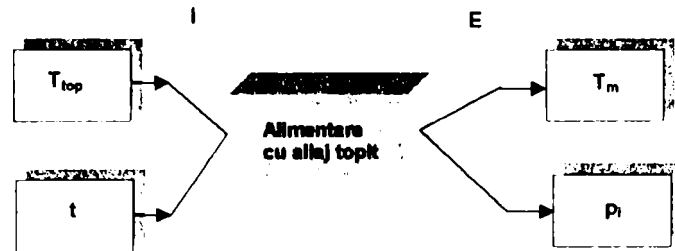


Fig.19 Sistem de mărimi în treapta de proces alimentare cu aliaj topit.

I – mărimi de intrare; E – mărimi de ieșire, T_{top} – temperatura topiturii; t – timpul în care se face alimentarea; T_m – temperatura masei de aliaj lichid; P_1 – proprietățile reperului.

• Sistem de mărimi

În ce privește procesul alimentare avem următorul sistem de valori de intrare și ieșire conform figurii 19.

2.2.2 Umplerea matriței

Curgerea aliajului sub presiune a fost cercetată de Leopold Frommer; experiențele și concluziile sale au servit drept bază cercetărilor ulterioare și unele dintre ideile avansate de Frommer își păstrează valabilitatea. Frommer a considerat aliajul lichid care curge sub presiune ridicată ca un lichid ideal, nevâscos și incompresibil [C.4].

În figura 20 este indicată schema de umplere progresivă a cavității amprentă din matriță de către aliajul lichid presat. Umplerea este deci realizată prin menținerea formei jetului la diametrul egal cu aria alimentatorului și depinde de lungimea cavității și aria suprafeței peretelui opus alimentatorului.

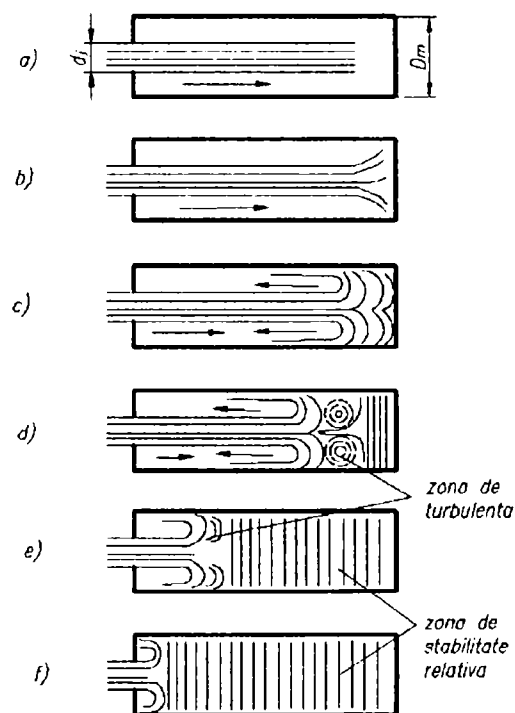


Fig.20 Curgerea aliajului lichid sub acțiunea presiunii de injectare și formarea zonelor turbulente și de stabilitate relativă în volumul metalului din cavitatea matriței, după L. Frommer.

a – f fazele succesive de umplere.

Caracterul curgerii, laminar sau turbulent, este dat după Frommer, în exclusivitate de raportul între diametrul jetului de aliaj D_j și diametrul cavității matriței D_m .

Astfel că pentru $0.25 < d_j/D_m < 0.75$, viteza de curgere a aliajului determinată de Frommer a fost între 0.3 – 30m/s.

Pentru $d_j/D_m < 0.25$ – curgere laminară și viteze mari de curgere;

$d_j/D_m > 0.75$ – curgere turbulentă și viteze mici de curgere.

Dacă se are în vedere epura diferitelor straturi concentrice care formează jetul de aliaj, ce curge pe un perete metalic care are o mare capacitate de extragere a căldurii figura 24 atunci concluziile lui Frommer trebuie interpretate în sensul că la viteze mari de curgere (obținute prin micșorarea raportului d_j/D_m) jetul reușește să-și păstreze liniaritatea, cu toată frânarea aerodinamică a crustei solidificate 2 figura 21 care se formează pe pereții canalului de curgere turbulentă cu efecte nedorite de antrenare în corpul piesei a aerului și gazelor din cavitatea matriței.

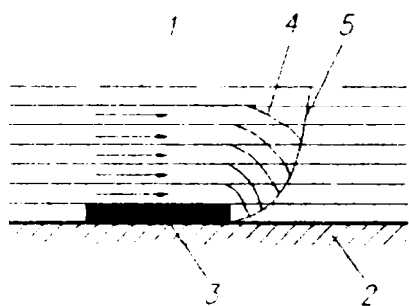


Fig.21 Epura vitezelor straturilor jetului de aliaj la curgerea sub presiune într-o formă metalică.

1- axa de simetrie a jetului și canalului pe care se rerealizează curgerea; 2 – forma metalică; 3 – crusta solidificată; 4 – straturi laminare ale jetului cu diferite viteze de curgere; 5 – variația vitezei medii de curgere pe secțiunea canalului transversal al matriței.

Se impune utilizarea unor secțiuni cât mai mici de alimentare (pentru o aceeași presiune de injecare în vederea obținerii unor viteze foarte mari de curgere ($v > 10\text{m/s}$) care să facă posibilă umplerea cavității și deplasarea aliajului lichid în rețeaua de tumare, cu toată crusta solidificată care se formează progresiv și care mărindu-și secțiunea transversală exponențial, în raport cu timpul, tinde să obtureze canalul de curgere.

Practic ar fi de dorit o presiune de injectare variabilă, adică o mărire a ei pe măsura formării crustei la contactul cu pereții matriței, pentru a face posibilă curgerea în continuare a jetului de aliaj lichid.

W. R. Brandt în urma unor experimentări de tumare sub presiune avansează ideea începerii umplerii cavității matriței încă de la secțiunea alimentatorului figura 22; el consideră că frontul de aliaj (1) avansează de la secțiunea alimentatorului sub presiunea fronturilor următoare (2,3,... n) și în acest fel, în timp, se realizează umplerea.

În prezent se consideră că umplerea și solidificarea pieselor turnate sub presiune cu grosime mică de perete are loc după modelul lui Frommer, iar cele cu secțiunea groasă după cel al lui Brandt.

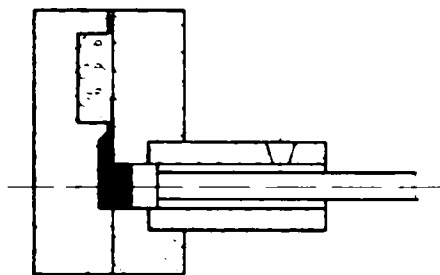


Fig. 22 Succesiunea fazelor de realizare a umplerii cavității matriței la turnarea sub presiune, după W.R.Brandt

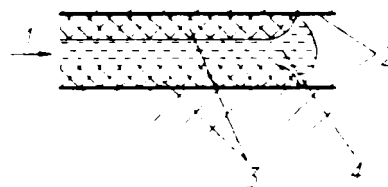


Fig.23 Secțiunea jetului de aliaj la turnarea sub presiune.
1 – direcția presiunii de injectare; 2 – pereții matriței; 3 – cruste solidificate la contactul aliaj – matriță; 4 – zona de curgere turbulentă intensă, cu incluziuni gazoase.

În figura 23 este prezentată secțiunea unui jet de aliaj la curgerea sub presiune model unanim acceptat, forma frontului de avansare trebuie înțeleasă prin considerarea epurei vitezelor straturilor concentrice de aliaj prezentată în figura 21.

- **Sistem de turnare la turnarea sub presiune**

Ansamblul duză, canale, diguri prin care aliajul topit ajunge în cuib, alcătuiește sistemul de turnare al matriței a cărei proiectare constă în alegerea amplasării cuiburilor, alegerea locului de injectare, stabilirea formei secțiunii și amplasarea canalelor de distribuție.

Alegerea și dimensionarea corectă a sistemului de turnare au o influență determinantă asupra calității pieselor turnate și asupra productivității procesului de prelucrare.

• Turnarea prin canale de distribuție

Acest sistem se folosește în cazul turnării în matrițe cu mai multe cuiburi 2 atunci când aliajul topit este distribuit din duza de alimentare, prin rețeaua de alimentare 1, canale de distribuție 3, la cuiburile matriței figura 24.

În vederea amplasării optime a cuiburilor în matrița de turnat sub presiune trebuie să se respecte următoarele reguli:

- Umplerea cuiburilor trebuie să se facă aproximativ concomitent;
- Drumul de curgere al aliajului topit prin canalele de distribuție trebuie să fie cât mai scurt posibil;
- Distanța dintre cuiburi trebuie să fie suficient de mare pentru a asigura răcirea și extragerea piesei turnate.

Modalități de amplasare a cuiburilor 1 în matriță și canalele de distribuție corespunzătoare 2 sunt prezentate în figura 25.

Canale de distribuție

Dimensionarea canalelor de distribuție este influențată de o mulțime de factori cum ar fi:

➤ Configurația matriței (geometria, volumul și grosimea pereților piesei turnate, condițiile de calitate impuse piesei);

➤ Mașina de turnat sub presiune (presiunea de turnare, frecvența turnărilor, tipul închiderii);

➤ Materialul turnat (vâscozitate, contracție, etc.);

➤ Modalitate de lucru (ciclu semiautomat, automat).

Geometria canalelor de distribuție este de foarte mare importanță figura 26.

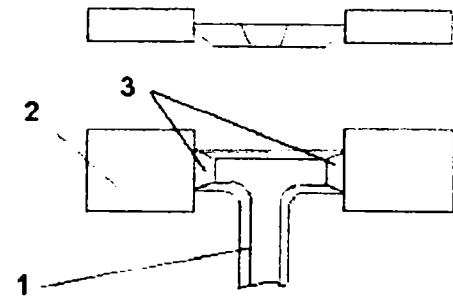


Fig. 24 Turnarea sub presiune cu canal de distribuție;

1 – rețea de distribuție; 2 – piesa turnată; 3 canal de distribuție.

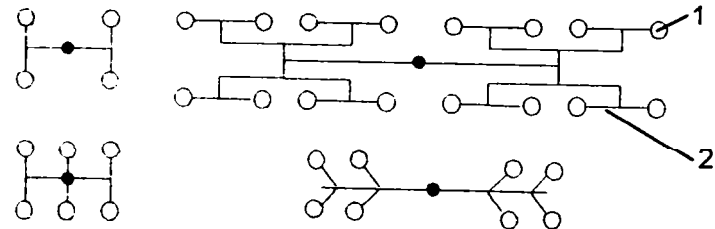


Fig. 25 Amplasarea cuiburilor 1 în matriță la sistemul de turnare sub presiune prin canale de distribuție 2.

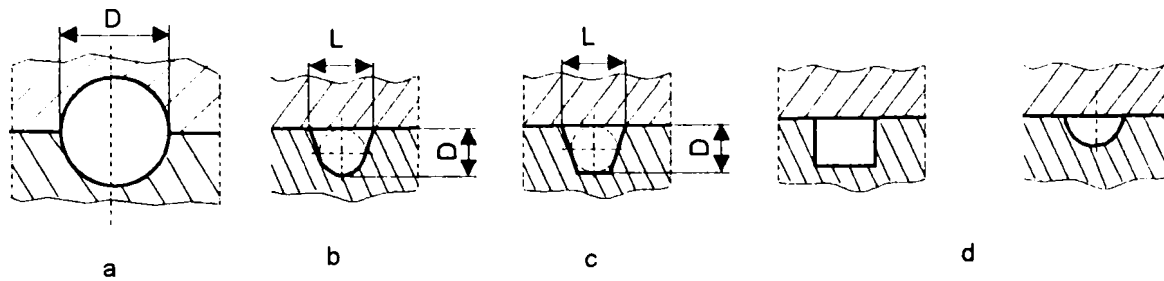


Fig. 26 Secțiunea canalelor de distribuție;
 a – secțiune circulară; b – secțiune parabolică; c – secțiune trapezoidală; d – secțiune nefavorabilă.

În figura 27 este prezentat un sistem de turnat sub presiune cu canale de distribuție.

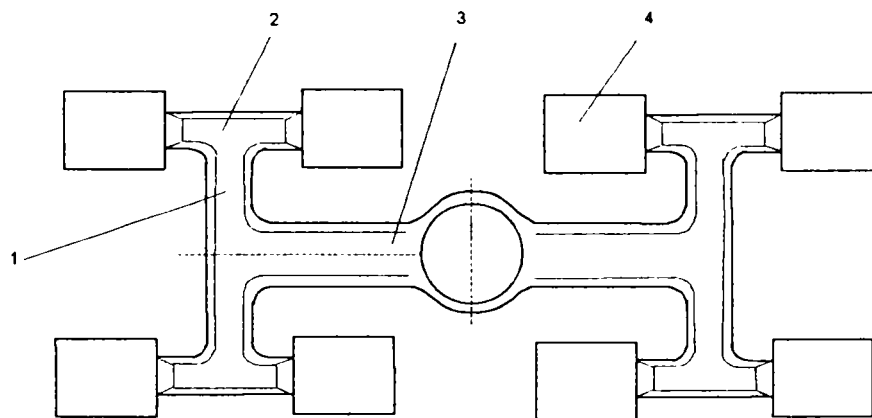


Fig. 27 Sistem de turnare sub presiune cu canale de distribuție;
 1,2 – canale de distribuție secundare; 3 – canal de distribuție principal; 4 – piesa turnată.

O rețea pentru turnarea sub presiune bine aleasă trebuie să asigure executarea ușoară a cavității corespunzătoare ei în semiforme, aerisirea rapidă și ușoară și separarea comodă de piesa turnată. De asemenea, la alegerea și amplasarea ei se va evita, dacă este posibil, orientarea jetului de metal lichid sub presiune asupra configurațiilor complicate, și, deci scumpe ale formei, care ar determina uzura lor prematură.

- **Definirea treptei de proces “umplere matriță”**

Treapta de proces “umplere matriță” cuprinde transportul aliajului topit din camera de compresie a mașinii de turnat sub presiune în cavitatea matriței.

Pentru umplerea matriței se stabilesc următoarele limite:

- început: startul mișcării de translație a pistonului în direcția duzei. Simultan se sfârșește treapta de proces alimentare.

- sfârșit: momentul umplerii volumetrică (aliajul topit ajunge în punctul cel mai îndepărtat față de punctul de alimentare). Simultan este începutul treptelor de solidificare și răcire.

Durata treptei de umplere matriță este timpul de umplere matriță t_u .

- **Fenomene care însoțesc curgerea aliajelor prin canale**

- a. **Pierderi de presiune**

Pierderi longitudinale, liniare sau distribuite. Pierderea hidraulică care apare pe o conductă dreaptă de secțiune constantă se numește pierdere longitudinală, liniară sau distribuită. [A.3]

Pierderile longitudinale la curgerea aliajelor prin canale drepte, umplute se determină cu ajutorul relației lui Darcy: [A2] [A3] [S1]

$$h_p = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

unde: λ - coeficientul de pierdere longitudinală;

l – lungimea canalului [m];

v – viteza aliajului [m/s];

d – diametrul hidraulic [m].

Valoarea coeficientului de pierderi longitudinale λ depinde de regimul de curgere exprimat prin numărul Reynolds, precum și de rugozitatea relativă k/d . [A.3, S.1]

Pierderi de presiune prin rezistențe locale. Prin rezistențe locale se înțelege rezistențele provocate de schimbările bruște de direcție și secțiune.

Pierderile de presiune prin rezistențele locale se exprimă prin relația: [A2] [A3] [S1]

$$h_r = \xi_r \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

în care: ξ_r - coeficient de pierdere al rezistenței locale;

v – viteza medie pe secțiune.

În cazul unor coturi nerotunjite apar doua zone de turbulență figura 28.

b) Aspirația de gaze și spumarea

Dacă într-un loc al rețelei de turnare apare o depresiune 1, gazele pătrund în acest loc fiind antrenate în cavitatea forme de jetul de aliaj lichid. Prin această antrenare depresiunea, se menține și cantități noi de gaze iau loc primelor cantități antrenate deja de jet.

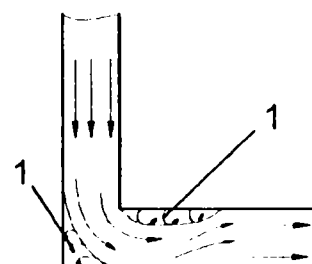


Fig. 28 Schema de curgere a aliajului lichid într-un canal cu cot de 90°

Apariția depresiunilor în care aliajul lichid se desprinde de pereții canalului este cauzată de:

- secțiunea canalului care nu urmărește micșorarea secțiunii jetului datorită creșterii vitezei prin canale;
- schimbarea bruscă de direcție (cot nerotujit).

Aceste cauze pot fi eliminate prin construirea unor rețele a căror secțiune să urmărească liniile de curent.

Gazele antrenate în cavitatea forme rămân incluse în corpul piesei sub formă de sufluri locale. Datorită temperaturii ridicate la care se găsește gazul incorporat în aliaj, volumul acestuia crește provocând sufluri de dimensiuni mari în piesa turnată și deci o piesă cu defecte.

În zonele de depresiune are loc în același timp un fenomen de turbionare. La schimbarea bruscă a secțiunii figura 29, lichidul nu-și poate schimba direcția cu 90° pentru a curge lângă perete și datorită inerției își continuă traiectoria apropiindu-se de perete în porțiunea de secțiune mai mare, datorită scăderii vitezei, după parcurgerea

Spațiul din colț 1 nu este parcurs de aliaj și prin frecare gazele sunt antrenate de jet 2 luând naștere astfel o depresiune. Datorită diferenței de presiune, particulele de la suprafața jetului se desprind de restul aliajului și luând o traiectorie circulară se întorc la suprafața aliajului lichid generând o mișcare turbionară 3.

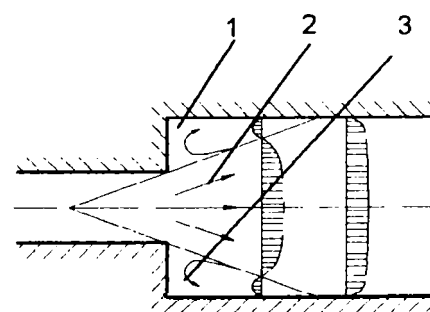


Fig. 29 Apariția mișcării inverse la schimbarea bruscă a secțiunii

În cazul aliajelor pe bază de aluminiu care au oxidabilitatea ridicată, particulele turbionare se oxidează și ajung din nou la suprafața aliajului topit contribuind la oxidarea altor porțiuni de aliaj lichid.

Deoarece oxizii formați la suprafața jetului au o tensiune superficială mare (în special în cazul aliajelor de Al), când incluziunile gazoase antrenate caută să iasă la suprafață, fie la curgerea prin canale, fie la curgerea prin cavitatea formei, sunt reținute de stratul de oxizi și se îmbracă astfel cu o peliculă rezistentă. Un ansamblu mai mare de astfel de bule îmbrăcate în pelicule de oxizi formează spuma. Locurile ocupate de aceasta în cavitatea formei nu mai pot fi umplute cu aliaj și piesa va prezenta defecte. Fenomenul de spumare este dăunător și îndepărtarea lui se poate realiza prin evitarea apariției turbioanelor.

b. Cavitația [S1]

Fenomenul de cavitație se produce la curgerea lichidelor care conțin incluziuni gazoase și reprezintă schimbarea bruscă a condițiilor hidrodinamice de curgere datorită apariției fazei gazoase, care distruge continuitatea jetului.

Procesul de cavitație apare în condițiile micșorării presiunii în jet, sub o valoare apropiată de valoarea presiunii vaporilor saturați ai aliajului.

Cavitația are loc pe întregul parcurs al curgerii aliajelor prin canalele rețelei de tumare și în cavitatea formei și mai ales în acele locuri unde au loc îngustări locale urmate de dilatări importante ale rețelei de tumare și în cazul schimbării direcției canalelor de tumare.

Fenomenul începe prin apariția unor incluziuni de gaze foarte mici care cresc formând cavități mari în faza lichidă în curgere.

Prin trecerea aliajului lichid de la presiuni scăzute în domeniul presiunilor mari se produce o explozie a incluziunilor gazoase, însoțită de o creștere bruscă, locală a presiunii care poate să atingă mii de atmosfere și este capabilă să distrugă pereții rețelei de tumare sau pereții frontului de solidificare,

Cavitația determină creșterea rezistenței la curgerea aliajelor prin canale și în cavitatea formei și reprezintă un fenomen nedorit.

- Sistem de mărimi

Se consideră treapta de proces umplere matriță ca un sistem cu un număr limitat de mărimi de intrare și ieșire conform figurii 30. Alți parametri ai aliajului topit, aspecte geometrice ale duzei, sistemul de alimentare al cavității matriței și cavitatea matriței se consideră caracteristici fixe ale sistemului considerat.

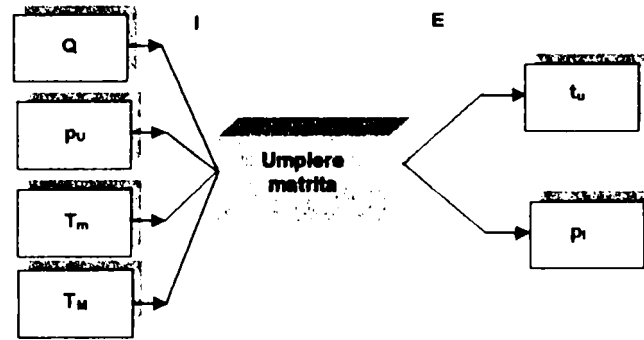


Fig.30 Sistem de mărimi în treapta de proces " umplere matriță ":
 I – mărimi de intrare; E – mărimi de ieșire; Q – debit de transport; P_u – presiunea de umplere; T_m – temperatura aliajului topit; T_M – temperatura matriței; t_u – timpul de umplere; ρ – proprietățile reperului.

Pentru studiul mărimilor de intrare ale sistemului de mărimi considerat, se apelează la schema simplificată a unei mașini de turnat sub presiune figura 31.

Debitul de transport Q , independent de modul real al construcției sistemului hidraulic al mașinii de turnat sub presiune utilizate, pompa hidraulică furnizează un debit de ulei hidraulic care poate fi reglat la diferite valori între limita maximă și minimă cu ajutorul unui drosel 5. Combinația dintre pompa hidraulică și supapa de reglare lucrează în așa fel încât debitul de

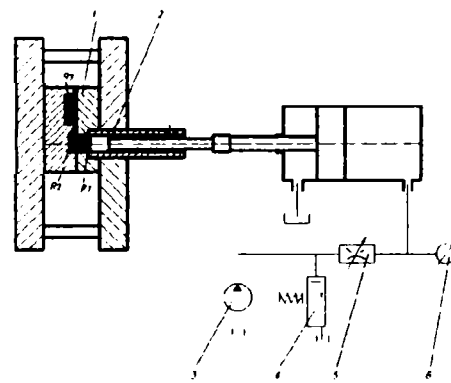


Fig.31 Schema simplificată a procesului de turnare sub presiune:
 1 – matrița; 2 – camera de compresie; 3 – pompa hidraulică; 4 – supapa de reglare a presiunii; 5 – drosel; 6 – manometru; R_1 – rezistența de curgere în duză; R_2 – rezistența de curgere în sistemul de alimentare; R_3 – rezistența de curgere în cuibul matriței; p_h – presiunea hidraulică.

ulei Q este aproape independent de presiunea hidraulică P_h care se formează ca urmare a rezistenței de curgere ce se opune topiturii în duză, sistem de alimentare și matriță.

Presiunea de umplere P_u . Rezistența de curgere pe care trebuie să o învingă topitura este formată din însumarea rezistențelor R_1 , R_2 și R_3 figura 31. Rezistențele R_1 ,

R_2 sunt constante în timpul umplerii matriței. Rezistența R_3 , care este rezistența matriței crește deoarece suprafața de contact între conturul piesei și matriță crește pe parcursul umplerii de la zero la o valoare finală.

N.H. Doehler utilizând montajul din figura 32 face o serie de determinări privind variația presiunii hidraulice și a presiunii de injectare în timpul presării la o mașină cu camera de compresie rece orizontală; curba tipică obținută a variației presiunii din cavitatea amprentă a matriței este prezentată în figura 33 cu perioadele și zonele caracteristice.

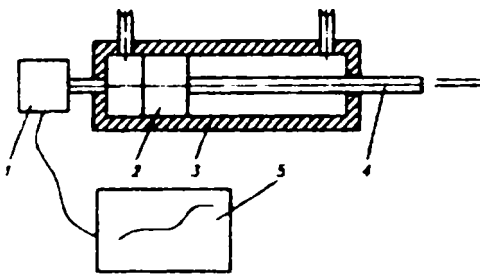


Fig. 32 Montajul experimental pentru determinarea variației presiunii în matriță în timpul presării aliajului;
1 – matrița, 2- piston de presare; 3 – camera de compresie; 4 – acționarea pistonului de presare; 5 – osciloscop care măsoară variațiile de presiune date de un traductor montat în matriță.

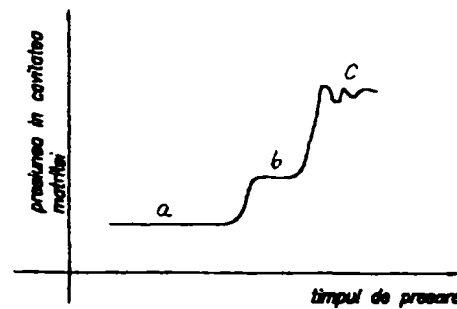


Fig.33 Curba variației în timp a presiunii din cavitatea matriței.
a – cursa de înaintare a pistonului; b – umplere matriță; c – creștere de presiune.

Temperatura materialului topit T_m

Aliajul în procesul de curgere pierde căldură (se răcește)

Cu creșterea temperaturii de turnare, crește și valoarea cantității de căldură conținută în aliaj și ca urmare, aceasta se va găsi în stare de curgere o perioadă mai mare. În general pentru a se asigura fluiditatea necesară, aliajul lichid se supraîncălzește cu 25 . . . 100 °C deasupra curbei lichidus.

Temperatura matriței T_M

O scădere a temperaturii matriței provoacă o creștere a părții de rezistență, dependentă de gradul de umplere al matriței (rezistența R3). Acest efect este mai vizibil la repere cu pereți subțiri decât la repere cu pereți groși.

Proprietăți ale reperelor P_i

Proprietățile reperelor, respectiv defectele cele mai importante ale reperelor, dependente de treapta " umplere matriță " sunt:

P_1 –starea de umplere. Starea de umplere insuficientă (repere tumate incomplet) apare ca urmare a unor fenomene de solidificare a topiturii pe parcursul curgerii aliajului.

2.2.3 Răcirea (solidificarea) aliajului în matriță

2.2.3.1 Interacțiunea termică aliaj – formă metalică

- **Particularitățile răcirii aliajului lichid în forme metalice.**

Aliajul lichid la turnarea în formă metalică, conține o cantitate mare de căldură Q care se poate calcula cu formula [C.4]:

$$Q = M \cdot c_{pl} \cdot T_{tur} \quad (13)$$

în care: M este masa aliajului lichid [kg];

c_{pl} – căldură specifică masică a aliajului în stare lichidă [J/kg.grad];

T_{tur} – temperatura de turnare [°C].

Această cantitate de căldură a fost înmagazinată de aliaj în timpul încălzirii și topirii, la elaborare, sub forma:

$$Q = M \cdot c_{ps} \cdot (T_{top} - T_0) + M \cdot L_t + M \cdot c_{pl} \cdot (T_{tur} - T_{top}) \quad (14)$$

unde cei trei termeni reprezintă cantități de căldură necesare realizării încălzirii, topirii și supraîncălzirii deci:

c_{ps} – căldură specifică masică a aliajului în stare solidă [J/kg.grad];

T_0 – temperatura mediului ambiant [°C];

T_{top} – temperatura de topire [°C];

L_t – căldura latentă masică de topire [J/kg];

În timpul răcirii, trecerea căldurii de la aliajul lichid la formă se realizează în următoarele etape:

- formarea unui gradient de temperatură în piesă, de la axa termică spre suprafața sa de contact cu forma;
- trecerea căldurii de la suprafața piesei la suprafața formei;
- formarea unui gradient de temperatură în formă de la interfața de contact cu aliajul lichid spre peretele exterior în contact cu atmosfera și acumularea unei cantități de căldură;
- transmiterea unei cantități de căldură de la peretele exterior al formei la atmosfera înconjurătoare.

Transmiterea căldurii de la aliajul lichid la forma de turnare se face prin modurile cunoscute de transfer de căldură. Aceste procese de transmitere a căldurii au următoarele particularități:

a) *Transmiterea căldurii prin convecție (contact)*, caracteristică unui fluid în mișcare purtător de căldură și un corp solid fix cu care vine în contact; evident că la încetarea mișcării aliajului lichid față de pereții amprentei formei, schimbul de căldură prin convecție încetează și apare conducția și radiația.

Cu aproximație se consideră că tot transmisie prin convecție este și cedarea căldurii de către peretele exterior al formei spre mediul atmosferic ambiant.

Pentru calculul fluxului de căldură transmis prin convecție Q_c se utilizează relația lui Newton: [C4]

$$Q_c = \alpha_c \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (15)$$

unde: α_c este coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție [W/m².grad];

S – aria suprafeței de contact [m²];

T_1 – temperatura aliajului lichid în mișcare față de pereții amprentei formei [°C];

T_2 – temperatura pereților amprentei formei [°C].

Mărimea coeficientului α_c depinde în primul rând de poziția relativă a aliajului lichid față de pereții amprentei formei (caracterul curgerii aliajului, viteza de curgere,

dinamica umplerii cu aliaj lichid), de proprietățile fizico – termice ale aliajului (temperatura de turnare, conductivitatea termică, densitate, vâscozitate, căldură specifică), precum și de forma de turnare (configurația și dimensiunile amprentei, grosimea pereților formeii, materialul formeii și proprietățile lui fizico – termice).

Din cauza numărului mare de factori care influențează mărimea coeficientului α_c , acestuia nu i se poate da o formă generală pentru determinarea lui, ci practic sunt utilizate anumite valori determinate experimental prin modelare fizică.

b) *Transmiterea căldurii prin conducție (conductivitate)* este procesul de trecere a căldurii, din aproape în aproape, între moleculele unui corp solid sau lichid. Are un rol determinant pentru realizarea gradientului de temperatură pe secțiunea peretelui piesei și al formeii, procesul putând fi exprimat prin ecuația lui Fourier (în cazul simplificat al fluxului unidimensional și în regim termic staționar) [C4] [S1]:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (\text{W/m}^2) \quad (16)$$

unde: q este densitatea fluxului termic în peretele piesei sau formeii metalice [W/m²]

λ - coeficient de conductivitate termică a aliajului turnat sau a metalului din care este confecționată forma de turnare [W/m.grad];

$\frac{dt}{dx}$ - gradient de temperatura pe direcția x în peretele piesei sau formeii [grad/m].

Fluxul de căldură Q_{II} ce trece prin conducție în unitatea de timp, prin suprafața A, când diferența de temperatură între două puncte, situate la distanța l, este de ($t_A - t_B$), conform legii lui Fourier va fi egal cu [C4]:

$$Q_{II} = \frac{\lambda}{l} \cdot A \cdot (t_A - t_B) \quad (17)$$

c) *Transmisia căldurii prin radiație* este fenomenul de trecere a căldurii de la un corp la altul sub formă de radiații termice.

• Capacitatea formei metalice de a extrage căldura cedată de aliajul lichid.

Formarea gradientului de temperatură pe grosimea peretelui piesei tuate în timpul solidificării și răcirii acesteia, precum și pe grosimea peretelui formei care preia cantitatea corespunzătoare de căldură cedată de aliajul lichid, depinde de următoarele mărimi termodinamice fundamentale:

- conductivitatea termică λ [W/m.K];
- căldura masică specifică c_p [J/ kg.K];
- densitatea ρ [kg/m³] sau greutate specifică γ [N/m²].

În timpul interacțiunii termice are loc răcirea aliajului lichid și încălzirea formei metalice; deși aceste procese se desfășoară cu viteze relativ ridicate, la piesele cu secțiuni mari, ele pot fi urmărite și analizate.

Capacitatea de extragere a căldurii de către materialul formei este cu atât mai mare cu cât aceasta se va încălzi mai puțin la primirea unei anumite cantități de căldură de la aliajul care se răcește.

Pentru aceasta trebuie ca conductivitatea termică a materialului formei să fie cât mai mare și să facă posibilă transferarea rapidă a căldurii de la piesă la formă și la mediul ambiant. Cu cât căldura masică specifică și densitatea formei sunt mai mari, cu atât aceasta, pentru o aceeași cantitate de căldură absorbită, își va modifica mai puțin temperatura în timpul răcirii piesei.

Forma metalică lucrează în principiu ca un schimbător de căldură și capacitatea sa de răcire naturală poate fi mărită prin diverse metode, în funcție de care se realizează apoi construcția ei.

Printr-o construcție adecvată în pereții formei metalice se pot practica o serie de orificii pentru circulația apei de răcire. Transferul de căldură este mult mărit, dar nu se reușește o solidificare dirijată din cauza imposibilității amplasării adecvate a sistemului de răcire. Intensificarea răcirii se obține atât prin modificarea debitului de apă, cât și printr-o amplasare corespunzătoare a canalelor.

2.2.3.2 Influența presiunii asupra procesului de solidificare

Procesul de cristalizare începe cu apariția în faza lichidă a gemenilor de cristalizare și cu creșterea acestora.

Cinetica transformărilor de fază poate fi apreciată cu ajutorul a doi parametri: numărul centrilor de cristalizare care apar în unitatea de volum și în unitatea de timp și viteza de creștere a acestor germeni.

Cu cât viteza de germinare este mai mare iar viteza de creștere a acestor germeni este mai mică, cu atât mai ușor se obține o structură cristalină fină.

Germenii de cristalizare pot să apară în volumul fazei lichide atât spontan cât și pe suprafața unor impurități suport care pot exista în aliaj; în acest ultim caz este vorba de o germinare forțată.

Conform teoriei molecularo-cinetice de cristalizare, germinarea spontană a gemenilor de cristalizare are loc în condițiile producerii în faza lichidă a unor fluctuații eterogene, adică a existenței unor porțiuni mici cu o repartizare a moleculelor identică cu cea din cristale.

Cu creșterea presiunii aplicate asupra aliajului lichid în timpul cristalizării se mărește numărul de germeni de cristalizare ai aliajului subrăcit. Această influență a presiunii este determinată de variația temperaturii de transformare monofazică, de variația energiei de transformare, precum și de variația energiei de suprafață la limita aliaj-cristal.

La aceeași viteză de răcire, cristalizarea în cazul presiunii atmosferice începe prin formarea unui număr mai mic de germeni de cristalizare și printr-o valoare mai mare a vitezei liniare de creștere a acestor germeni, ceea ce evident conduce la obținerea unor cristale mari. Mărirea presiunii, din contră, determină mărirea numărului de germeni de cristalizare și micșorarea vitezei liniare de creștere a acestora ceea ce duce la obținerea unor structuri granulare fine.

Mărirea presiunii la cristalizarea aliajului determină un contact mai intim între aliajul lichid și forma de turnare; în marea majoritate a cazurilor procedeele speciale de turnare utilizează forme metalice care au particularitatea că intensifică interacțiunea termică aliaj lichid-formă și prin aceasta contribuie la creșterea energiei de activare, ca urmare a măririi densității și a conductivității termice a sistemului.

Prin aplicarea presiunii asupra aliajului în curs de solidificare se micșorează volumul de retasură precum și volumul de microretasură. Sub acțiunea presiunii faza lichidă poate să se filtreze mai ușor prin canalele capilare dintre cristalele în curs de creștere și să compenseze microretasurile; în același timp are loc și o îndesare mecanică a aliajului. Sub acțiunea presiunii se constată de asemenea o schimbare a contractiei liniare precum și a tendință de formare a crăpăturilor la cald.

2.2.3.3 Compactizarea (postpresarea)

După umplerea matriței aliajul topit trebuie compactat (îndesat), deoarece aliajele au la temperatura de prelucrare un volum specific mai scăzut decât la temperatura mediului ambiant. Dacă procesul de turnare sub presiune ar avea loc fără compactare, reperul răcit ar prezenta un volum diferit de volumul cavității matriței. La contractie, în funcție de configurația reperului și a procesului de răcire, ar lua naștere retasuri și goluri. Acestea sunt compensate prin compactarea topiturii.

Prin procesul de compactizare se înțelege introducerea unei cantități suplimentare de aliaj topit în cavitatea matriței, după umplerea volumetrică. Această cantitate de metal se numește cantitate de compactizare.

Pentru a se realiza procesul de compactizare, cursa pistonului se reglează astfel încât nu tot aliajul topit din camera de compresie să fie împins în matriță, ci să rămână un rest numit adaos tehnologic.

Definirea treptei de proces compactizare (postpresare)

Compactizarea este acea parte a procesului de turnare sub presiune în timpul careia în cavitatea matriței există o presiune aproape hidrostatică care este influențată de pistonul mașinii de turnat sub presiune.

Pentru compactizarea aliajului se stabilesc următoarele stadii:

- început: momentul umplerii volumice (aliajul atinge punctul cel mai îndepărtat de la locul de injectare). Simultan se sfârșește umplerea matriței, exprimat prin expirarea timpului de umplere t_u și începutul treptei de solidificare;

- sfârșit: sfârșitul timpului de solidificare

Durata treptei de compactizare rezultă din varianta constructivă a matriței utilizată, sistemul de turnare, temperatura aliajului topit și a matriței.

2.2.3.4 Răcirea piesei în matriță

Răcirea piesei turnate de la valoarea maximă a temperaturii aliajului topit, la temperatura de evacuare, solicită, datorită conductivității aliajului, un timp relativ scurt.

Temperatura într-un loc din interiorul reperului evoluează conform figurii 34 până la punctul A ($t = t_r$) reperul se găsește în matrița închisă. După deschiderea matriței, procesul de răcire continuă în afara matriței.

Pentru procesul de turnare sub presiune, în primul rând, este importantă examinarea fenomenelor de răcire în interiorul matriței.

Tehnologia turnării sub presiune presupune obținerea unui timp și viteze de răcire astfel încât să se asigure calitatea prescrisă a piesei turnate.

Prin variația timpului de răcire și a temperaturii matriței (care determină viteza de răcire) se epuizează posibilitățile tehnologice de influențare a procesului de răcire în matriță.

- **Definirea treptei de proces “ răcire “**

Ca treaptă de proces, răcire, este considerată partea procesului de răcire care are loc în matriță.

Pentru durata treptei de proces răcire, și prin aceasta și a timpului de răcire t_r , definim următoarele limite:

- început: momentul încheierii procesului de umplere volumetrică a matriței (masa aliajului lichid ajunge în punctul cel mai depărtat de la locul de injectare din matriță). Fenomenul se petrece simultan cu sfârșitul treptei de proces “ umplere matriță “, exprimat prin sfârșitul timpului de umplere t_u ;
- sfârșit: începerea procesului de deschidere a matriței simultan cu începutul aruncării piesei din matriță.

Timpul de răcire t_r nu se poate regla direct pe mașinile de turnat sub presiune. În majoritatea cazurilor este reglabil un timp parțial de ciclu, numit timp de menținere.

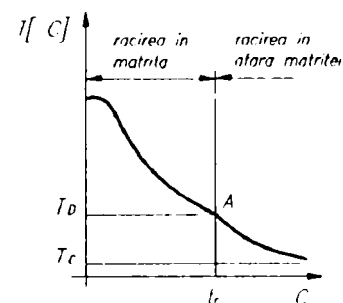


Fig. 34 Evoluția temperaturii în centrul unui reper în timpul răcirii:

T_D – temperatura de extragere a piesei din matriță; T_C temperatura camerei; t_r – timp de răcire.

• Sistem de mărimi

Se consideră o matriță de turnat sub presiune figura 35.

Temperatura matriței care este mărime hotărâtoare pentru viteza de răcire și proprietățile reperului injectat, se stabilește în funcție de schimbul de căldură care are loc în matriță:

- între aliajul .on.t d.n c_vi...e matriței și materialul matriței Q;
- între matriță și mediul de răcire Q_T;
- între matriță și mediul înconjurător Q_E.

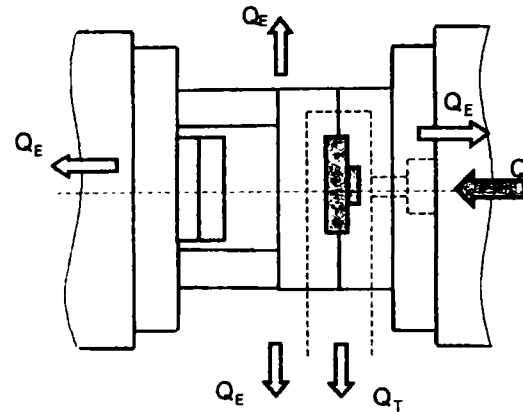


Fig.35 Schimbul de căldură la o matriță de turnat sub presiune

Dacă se consideră fluxurile termice care pătrund în matriță ca pozitive, iar fluxurile termice care părăsesc matrița ca negative, atunci se poate scrie ecuația de bilanț:

$$Q + Q_E + Q_T = 0 \tag{18}$$

Se poate exprima cantitatea de căldură care pătrunde în matriță este identică cu cantitatea de căldură cedată de matriță, în cazul în care temperatura matriței se consideră constantă în timp.

Aceste mărimi se pun în evidență considerând treapta de proces "răcire" ca un sistem limitat de mărimi de intrare și ieșire figura 36.

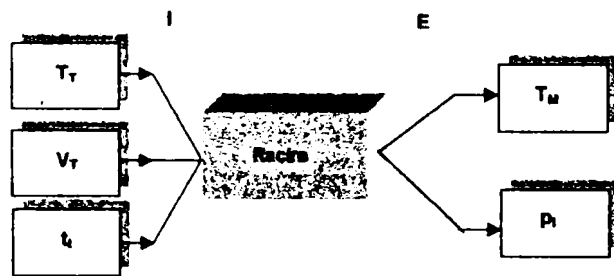


Fig.36 Valori de intrare și ieșire a treptei de proces "răcire":

I – mărimi de intrare; E – mărimi de ieșire, T_T – temperatura lichidului de temperare, V_T – debitul lichidului de temperare; t – durata ciclului, T_M – temperatura matriței.

Temperatura T_T respectiv debitul de curgere V_T al lichidului de temperare.

Se utilizează ca mărimi de reglare, fie temperatura lichidului T_T fie debitul lichidului V_T.

În domeniul normal al răcirii matriței mediul uzual de temperare este apa din circuitul industrial al firmei. În acest caz temperatura de intrare T_T este o mărime neinfluențabilă de tehnologie, iar mărimea de reglaj este debitul V_T .

Un dezavantaj al reglării debitului este faptul că la viteze mici de curgere apa se încălzește puternic în matriță și prin aceasta procesul de răcire la intrarea în matriță este mai intens decât la ieșirea din matriță.

Timpul de răcire t_r , respectiv durata ciclului t_t

Cu cât durata ciclului t_t este mai scurt, cu atât este mai mare cantitatea de căldură transportată în matriță pe unitatea de timp.

Timpul total al unui ciclu se poate scrie:

$$t_t = t_u + t_r + t_a \quad (19)$$

unde: t_u – timp de umplere;

t_r – timp de răcire;

t_a – timp de evacuare.

Deoarece:

$$t_u \ll t_r + t_a \quad (20)$$

$$t_d = k \quad (\text{constantă}) \quad (21)$$

rezultă:

$$t_t \cong t_r + k \quad (22)$$

Din relația de mai sus se observă că cei doi timpi t_t și t_r pot fi considerați ca forme diferite ale aceleiași mărimi de reglare. Aceasta corespunde practic mișcărilor acestora și a pauzei, timpul de aruncare t_a nu se mai schimbă.

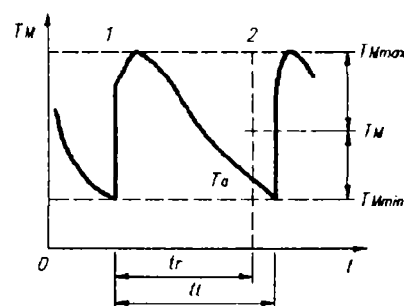


Fig. 37 Variația în timp a temperaturii matriței;
1 – punct de început de răcire; 2 – punct de sfârșit de răcire. T_M - temperatura matriței

Temperatura matritei T_M

Temperatura hotărătoare pentru viteza de răcire și formarea proprietăților reperului este temperatura peretelui matritei în zona conturului. Ea oscilează în timpul procesului de turnare sub presiune figura 37.

Înainte de umplere are o valoare minimă și imediat după umplere o valoare maximă (tabelul 7) Aceasta este influențată de conductibilitatea termică (tabelul 8)

Tab.7 Valori optime ale temperaturilor de preîncălzire ale matritelor la turnarea sub presiune pentru diverse aliaje

Nr. crt.	Aliaj turnat	Temperatura matritei în momentul presării [°C]
1	Cu bază de Pb	120-140
2	Cu bază de Sn	130-150
3	Cu bază de Zn și Cu	180-220
5	Cu bază de Al și Si	200-260
5	Cu bază de Cu	300-350

Tab.8 Coeficientul de conductibilitate termică pentru diferite materiale

Material metalic	ρ [kg/m ³]	T [°C]	λ [W/m °K]
Oțel	7800	100	50.2
Aluminiu	2700	0	209.34
Cupru	8300	20	272.16
Alama	8600	0	102... 105
Bronz	8766	20	41.86

Amplasarea sistemului de temperare

Amplasarea sistemului de temperare trebuie să se facă în concordanță cu următoarele principii:

- Temperarea uniformă a întregii suprafețe a cuibului matritei;
- Amplasarea canalelor în lungul drumului de curgere al metalului topit în matrită
- Numărul schimbărilor de direcție al circuitului de răcire să fie cât mai mic;

- Asigurarea etanșeității circuitelor de temperare.

Temperarea plăcilor matrițelor de tumat sub presiune se face doar pentru plăcile de formare.

Circuitul de răcire cel mai frecvent utilizat pentru răcire se realizează prin canale rectilinii, legătura dintre canalele de răcire asigurându-se fie prin intermediul unor canale suplimentare practicate în plăcile matriței, sau printr-o legătură exterioară cu tuburi flexibile figura 38.

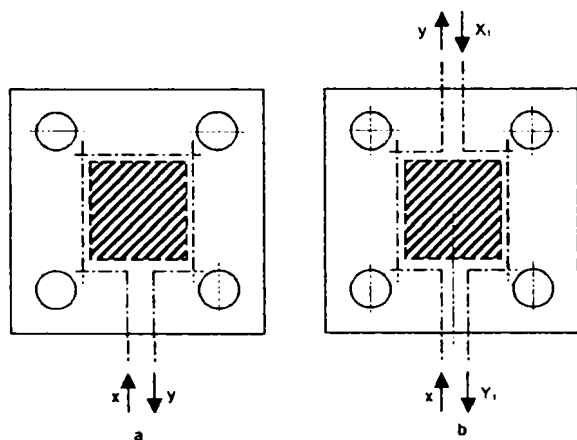


Fig. 38 Temperarea plăcilor;
a – rețea cu intrarea și ieșirea apei de aceeași parte a matriței; b – rețea cu intrarea și ieșirea apei separate.

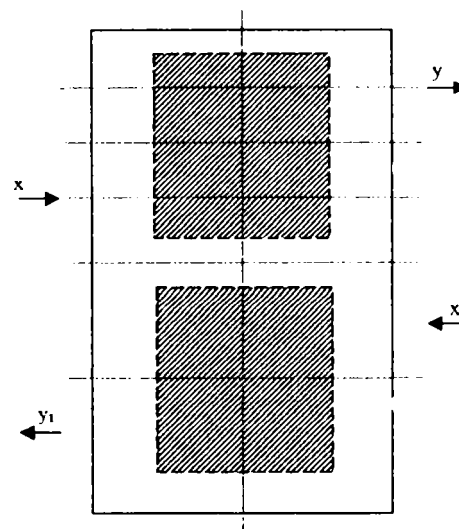


Fig. 39 Temperarea plăcilor

La amplasarea canalelor de răcire în matrițe trebuie să se țină cont și de transferul local de căldură, răcirea trebuind să fie mai intensă în zonele cu temperatura mai ridicată figura 39.

Pentru răcirea plăcilor se folosesc canale care realizează circuite lungi care urmăresc o răcire optimă, ocolind obstacolele din placă (coloane de ghidare, știfturi etc) figura 40.

Proprietățile reperului P_1

Răcirea influențează în primul rând deformarea, contractia, tensiuni interne, proprietățile mecanice și calitatea suprafeței piesei.

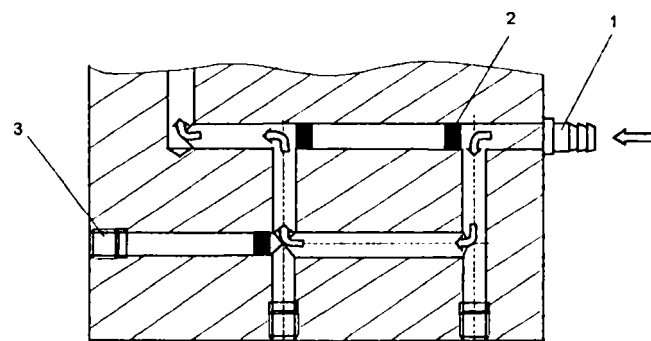


Fig.40 Circuit lung de răcire printr-o placă de formare:
1 – racord de răcire; 2 – dop de dirijare; 3 – dop de etanșare.

Totalitatea proprietăților reperului influențate de procesul de răcire, depind în exclusivitate de temperatura matriței T_M și se va lua în considerare în toate cazurile când se pune accent pe respectarea dimensiunilor și calitatea suprafețelor.

Contractia [D7]

Contractia este fenomenul de micșorare a volumului specific al aliajelor în timpul procesului de răcire. În figura 41 este reprezentată variația volumului specific al aliajelor în funcție de temperatură începând din starea supraîncălzită până la starea solidă (temperatura mediului ambiant)

Micșorarea volumului în porțiunea DC este corespunzătoare intervalului dintre temperatura de

supraîncălzire (temperatura de turnare) și temperatura începutului de solidificare și se numește *contractie de supraîncălzire*.

Contractia de supraîncălzire (contractie volumică în stare lichidă) este:

$$\epsilon_{vl} = \alpha_l (T_t - T_l) \cdot 100 \% \tag{23}$$

unde: ϵ_{vl} - contractie de supraîncălzire (volumică);

α_l - coeficient de contractie volumică a aliajului la răcirea în stare lichidă;

T_t - temperatura de turnare a aliajului $^{\circ}C$;

T_l - temperatura lichidus (de început de solidificare) a aliajului $^{\circ}C$.

Coeficientul de contractie în stare lichidă este:

$$\alpha_l = \frac{V_T - V_l}{V_l (T_t - T_l)} \tag{24}$$

unde: V_T - volumul aliajului la temperatura de turnare;

V_l - volumul aliajului la temperatura lichidus.

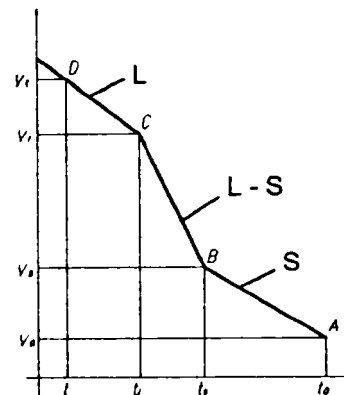


Fig.41 Variația volumului specific al aliajelor cu temperatura de răcire; V_0 - volumul la temperatura obișnuită; V_s - volumul la temperatura de solidificare; V_l - volumul aliajului după topirea completă; V_t - volumul aliajului supraîncălzit; t_0 - temperatura mediului ambiant; t_0 - temperatura de solidificare; t_l - temperatura aliajului după topirea completă; t - temperatura aliajului supraîncălzit.

CB – contractia de solidificare corespunzătoare intervalului de solidificare. Contractia aliajului în stare solidă, după solidificare poate fi determinată cu ajutorul relației:

$$\varepsilon_{vs} = \alpha_s (T_s - T_0) \cdot 100 \quad (25)$$

unde: ε_{vs} - contractia volumică în stare solidă;

α_s - coeficient de contractie volumică în stare solidă;

T_s – temperatura solidus;

T_0 – temperatura mediului ambiant (+20°C);

V_s, V_0 – volumul aliajului la temperatura T_s și respectiv la T_0 .

unde:

$$\alpha_s = \frac{L_s - L_0}{L_0 (T_s - T_0)} \quad (26)$$

în care: L_s – lungimea piesei la temperatura de sfârșit de solidificare (T_s);

L_0 – lungimea piesei la temperatura ambiantă (T_0).

Din momentul sfârșitului procesului de solidificare și până la temperatura mediului ambiant are loc așa-numita contractie liniară de tumare și corespunde porțiunii BA.

Coeficientul de contractie la tumare se calculează cu relația:

$$\alpha_t = \frac{l_t - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (27)$$

în care: α_t - coeficient de contractie de tumare;

l_t – dimensiunea cavității piesei la tumare;

l_0 – dimensiunea piesei la temperatura ambiantă.

Contractia la tumare

$$\varepsilon_t = \alpha_t (T_t - T_0) \cdot 100 \quad (28)$$

contractia liniară de tumare reprezintă tocmai diferența dimensională dintre model și piesa tumată la temperatura mediului ambiant.

În tabelul 9 se dă contractia volumetrică la solidificare pentru unele aliaje frecvent utilizate în practica tumării pieselor.

Tab.9 Con trac ția de volum la solidificarea unor aliaje de turnătorie

Aliaj	Con trac ția de volum [%]
Aliaj de aluminiu	4 – 7
Aliaj de magneziu	5.2 – 6
Bronz cu aluminiu	4 – 5
Alame	4.9 – 7.1
Siluminiu (ATSi12)	3.8 - 7

Con trac ția totală a aliajelor este compusă din con trac țiile: la solidificare și în stare solidă, și este determinată în principal de intervalul de temperatură la trecerea din S → L la care se referă procesul de con trac ție și de natura metalelor care stau la baza formării aliajelor tehnice folosite la turnare.

2.2.4 Evacuare (aruncarea) piesei din matriță

După răcire, respectiv solidificarea piesei turnate, aceasta trebuie eliminată din matriță după ce s-a răcit complet.

Faza de scoatere, respectiv de aruncare a piesei din matriță, face parte din ciclul de turnare sub presiune.

În general, piesa turnată rămâne în partea mobilă a matriței de unde este aruncată de un sistem de aruncare figura 42.

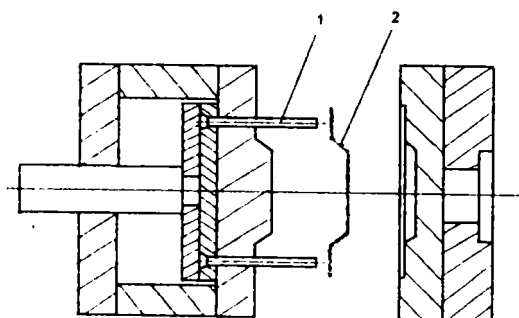


Fig.42 Schema de principiu pentru sistemul de aruncare;
1 – sistem de aruncare; 2 – piesa turnată.

Aruncarea mecanică

Acest sistem de aruncare este cel mai utilizat sistem de aruncare a pieselor din matrița de turnare sub presiune.

Mecanismul de aruncare este acționat de către mașina de turnat sub presiune în timpul deschiderii matriței.

Aruncarea mecanică se rezolvă cel mai simplu atunci când piesa turnată rămâne în partea mobilă a matriței.

Există mai multe metode de aruncare mecanică a pieselor turnate sub presiune din matriță cele mai întrebuițate fiind aruncarea cu știfturi de aruncare respectiv aruncarea tubulară (știfturi tubulare).

Alegerea uneia sau alteia dintre metodele de aruncare este determinată de forma constructivă și cerințele estetice ale piesei turnate.

Tije de aruncare

Tijele de aruncare iau contact cu opritorul mașinii și acționează prin acesta sistemul de aruncare format din placa aruncătoare – placa portaruncătoare, aruncătoare și știfturi readucătoare.

Soluția constructivă pentru tije aruncătoare sunt prezentate în figura 43. Tijele aruncătoare alunecă pe bucușa de ghidare.

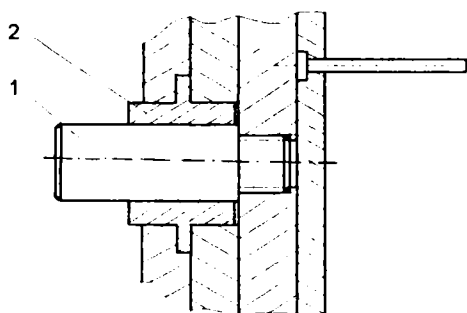


Fig. 43 Tije aruncătoare;
1 – tije aruncătoare; 2 – bucușa de ghidare.

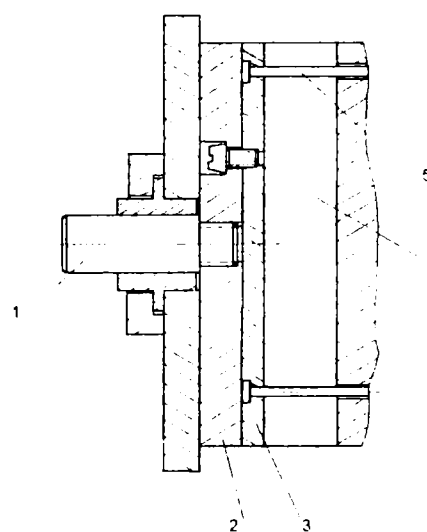


Fig.44 Placa aruncătoare – placa portaruncătoare;
1 – tija de aruncare; 2 – placa aruncătoare; 3 – placa portaruncătoare; 4 – șurub; 5 – aruncător.

Placa aruncătoare, placa portaruncătoare

Placa aruncătoare și placa portaruncătoare formează un subansamblu care îndeplinește următoarele funcții:

- Transmite mișcarea de la tija de aruncare spre aruncătoare;
- Fixează elementele de aruncare (aruncătoare, știfturi readucătoare);
- Execută mișcarea de readucere a sistemului în poziția inițială ca urmare a sistemului de readucere (arcuri sau știfturi readucătoare).

Grupul de placi de aruncare poate fi urmărit în figura 44.

Placa aruncătoare 2 și placa portaruncătoare 3 sunt fixate cu șuruburile 4 în placa portaruncătoare sunt fixate aruncătoarele 5. Forma și poziția de așezare în cadrul matriței este determinată de așezarea pieselor turnate în placa de formare.

Aruncătoare tip știft

Este cel mai răspândit sistem de aruncare la matrițele de turnat sub presiune figura 45.

La deschiderea mașinii, tija de aruncare ia contact cu opritorul mașinii de turnat și împinge înainte placa aruncătoare. Știfturile de aruncare scot piesa turnată din cuib. Știfturile reeducătoare servesc pentru reeducerea plăcii aruncătoare în poziția inițială, odată cu închiderea mașinii, pentru începerea unui nou ciclu de turnare.

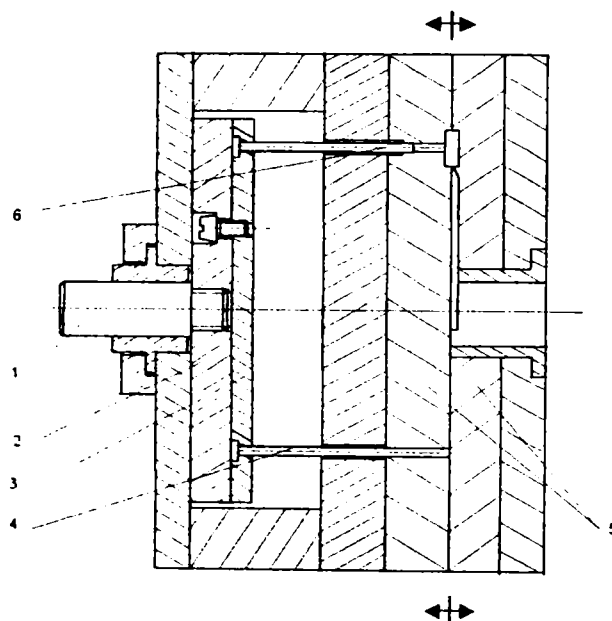


Fig. 45 Aruncare cu știfturi;
1 – tija de aruncare; 2 – placa aruncătoare; 3 – placa portaruncător, 4 – știft readucător, 5 – placa de formare; 6 – știft de aruncare.

2.2.5 Timpul total al unui ciclu de turnare sub presiune

În figura 46 este pus în evidență un ciclu de turnare sub presiune cu punerea în evidență a treptelor de proces precum și a timpilor corespunzători.

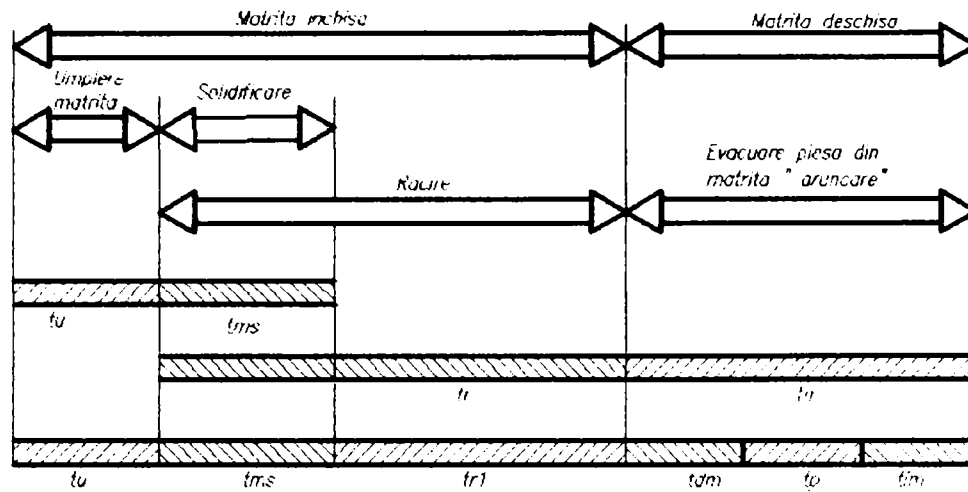


Fig.46 Ciclu de turnare sub presiune

Timpul total al unui ciclu de turnare sub presiune este dat de relația:

$$t_t = t_u + t_r + t_a \quad (29)$$

unde timpul de răcire este dat de relația:

$$t_r = t_{ms} + t_{r1} \quad (30)$$

unde t_{ms} – timpul de menținere pentru solidificare;

t_{r1} – timp de menținere până la temperatura de evacuare.

Timpul de evacuare piesă din matriță "aruncare"

$$t_a = t_{dm} + t_p + t_{im} \quad (31)$$

unde: t_{dm} – timp de deschidere matriță – timp între sfârșitul și începutul deschiderii matriței;

t_p – timp de pauză – timpul între începutul închiderii și sfârșitul deschiderii matriței;

t_{im} – timp închidere matriță – timp între sfârșitul și începutul închiderii matriței

Înlocuind relațiile (4.20), (4.21) în (4.19) se determină timpul total t_t :

$$t_t = t_u + t_{ms} + t_{r1} + t_{dm} + t_p + t_{im} \quad (32)$$

pentru fiecare reper există o valoare minimă a duratei ciclului de turnare sub presiune bazată pe tehnica procesului. Această durată este dată de dimensiunile

Teză de doctorat

reperului (tabelul 10), de cerințele care trebuie să le satisfacă reperul și de condițiile tehnice în care se realizează reperul.

Tab.10 Valori ale timpului de umplere a matriței la turnarea sub presiune

Nr. crt	Grosimea medie a peretelui piesei turnate [mm] (raza echivalentă a secțiunii)	Timpul aproximativ de umplere a formei [s]
1	1.5	0.01-0.03
2	1.8	0.02-0.04
3	2.0	0.02-0.06
4	2.3	0.03-0.07
5	2.5	0.04-0.09
6	3	0.05-0.10
7	3.8	0.05-0.12
8	5.0	0.06-0.20
9	6.4	0.08-0.30

2.3. Exemple de tehnologii de obținere a pieselor turnate sub presiune

2.3.1 Tehnologie de obținere a unui mâner

Piesa turnată

Produsul este un mâner de siluminiu cu ajutorul căruia se acționează tija pătrată a broaștelor aplicate pe uși figura 47. Mânerul în forma finală este vopsit electrostatic.

Pe suprafața 1 figura 47 a mânerului există un orificiu pătrat în care va intra tija pătrată de acționare a broaștei.

Matrița

Piesa se va turna sub presiune în matrița cu patru cavități amprentă 1 figura 48.

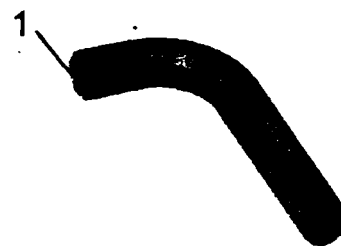


Fig.47 Mâner

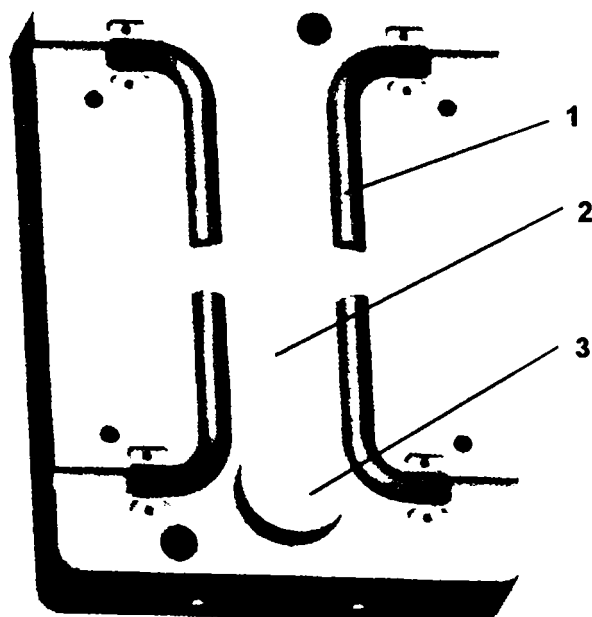


Fig.48 Vederea unei plăci active a matriței cu cele patru cavități amprentă;
1-cavitatea amprentă; 2- rețea de turnare; 3- adaos tehnologic.

Orificiul pătrat de pe suprafața 1 figura 47 a piesei se execută cu ajutorul unui miez mobil 1 montat în bacul 2 figura 49.

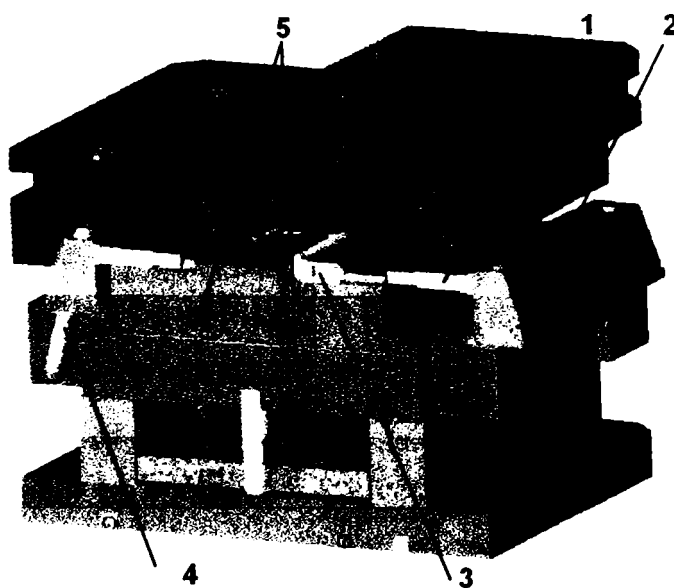


Fig.49 Secțiune prin matrița de turnat sub presiune mâner;
1-miez; 2- bac mobil; 3-piesă; 4- coloană; 5- canale de temperare.

Teză de doctorat

Planul de separație se va alege astfel încât să se realizeze profilul piesei, să se asigure evacuarea ușoară a piesei din matriță și o umplere completă a cavității matriței.

Planul de separație se va alege conform figurii 47 adică în planul axial al piesei, piesa formându-se în ambele semimatrițe figura 50.

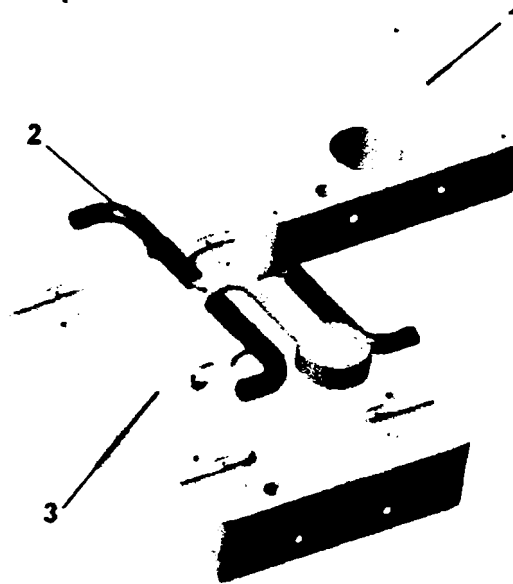


Fig.50 Semimatrițele de turnare a mânerului:
1- semimatrița fixă; 2- piesa; 3- semimatrița mobilă.

Rețeaua de alimentare este prezentată în figura 51.

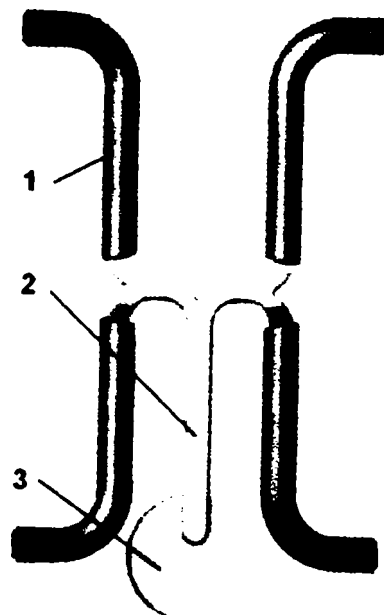


Fig.51 Rețeaua de alimentare la turnarea sub presiune a unui mâner;
1- piesa; 2- rețeaua de alimentare; 3- adaosul tehnologic.

Sistemul de turnare sub presiune

După alimentarea cu aliaj topit (siluminiu) la temperatura de 660°C a camerei de compresie aliajul topit sub acțiunea pistonului mașinii de turnat sub presiune intră în duza matriței 1 fig.52.a , rețeaua de alimentare 2 , cavitatea amprentă a matriței 3 fig.52.b pe care o umple în întregime realizându-se după răcire (solidificare) piesa 4 fig.52.b.

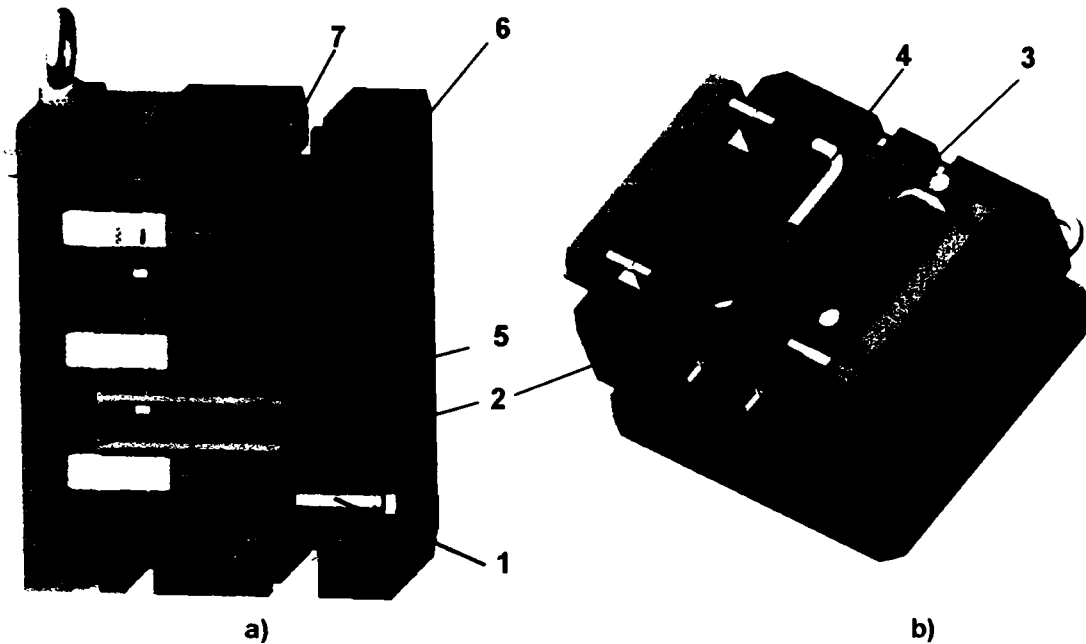


Fig.52 Matriță de turnat sub presiune;

a) matrița închisă; b) parte mobilă a matriței; 1- duza de alimentare; 2- rețea de alimentare; 3- cavitate amprentă; 4- piesa turnată sub presiune; 5- sistem de aruncare; 6- semimatrița fixă; 7- semimatrița mobilă.

Construcția și funcționarea matriței

Planul de separație al matriței se realizează astfel încât piesa să se formeze în cele două semimatrițe 1 și 3 figura 50.

Orificiul pătrat se realizează cu ajutorul miezului 1 montat în bacul 2 figura 49.

După umplerea matriței cu aliaj topit a cavității amprentă a matriței și solidificarea acesteia urmează evacuarea piesei împreună cu rețeaua figura 50, figura 51 utilizându-se sistemul de aruncare cu tija de aruncare 5 figura 52.a.

Extragerea miezurilor se realizează cu ajutorul mișcării de retragere a bacurilor 2 acționate prin intermediul coloanelor 4 figura 49. Această mișcare este corelată cu mișcarea de deschidere a matriței. Readucerea în poziția inițială se realizează concomitent cu închiderea matriței.

Temperarea matriței

Pentru realizarea unei temperaturi optime matrița este prevăzută cu canale de temperare 5 figura 49 practicate în ambele semimatrițe.

2.3.2 Tehnologie de obținere a unei bucșe.

Piesa turnată

Produsul este o bucșă ce intra în componența broaștelor folosite la uși figura 53.

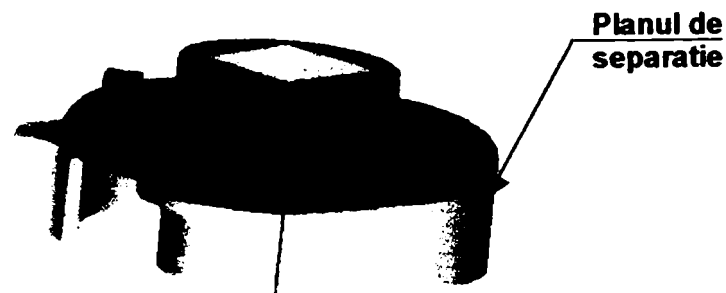


Fig.53 Bucșa

Materialul din care este confecționată bucșa este siluminiu.

Matrița

Piesa se obține prin turnare sub presiune într-o matriță cu 16 cavități amprentă (cuiburi) figura 54.

Orificiul pătrat se realizează cu ajutorul miezurilor 4 figura 54. planul de separație se alege astfel încât să se poată realiza evacuarea piesei turnate din matriță figura 53. piesa se formează în ambele semimatrițe figura 54. alimentarea cavității amprentă se realizează cu ajutorul unei rețele de turnare 3 figura 54.

Sistemul de turnare sub presiune

Aliajul topit este introdus sub acțiunea pistonului mașinii de turnat sub presiune, prin intermediul rețelei de turnare 3 în interiorul cavității amprentă 2 pe care le umple în întregime. La fiecare turnare rezultă 16 piese.

Construcția și funcționarea matriței

După umplerea cavității amprentă a matriței și solidificarea aliajului evacuarea pieselor împreună cu rețeaua de turnare se realizează cu ajutorul extractoarelor și a tuburilor extractor 5 care ajută la extragerea piesei de pe miezul pătrat 4 figura 54.

Temperarea matriței

Pentru temperarea matriței se folosesc canale de răcire 6 figura 53 practicate în cele două semimatrițe.

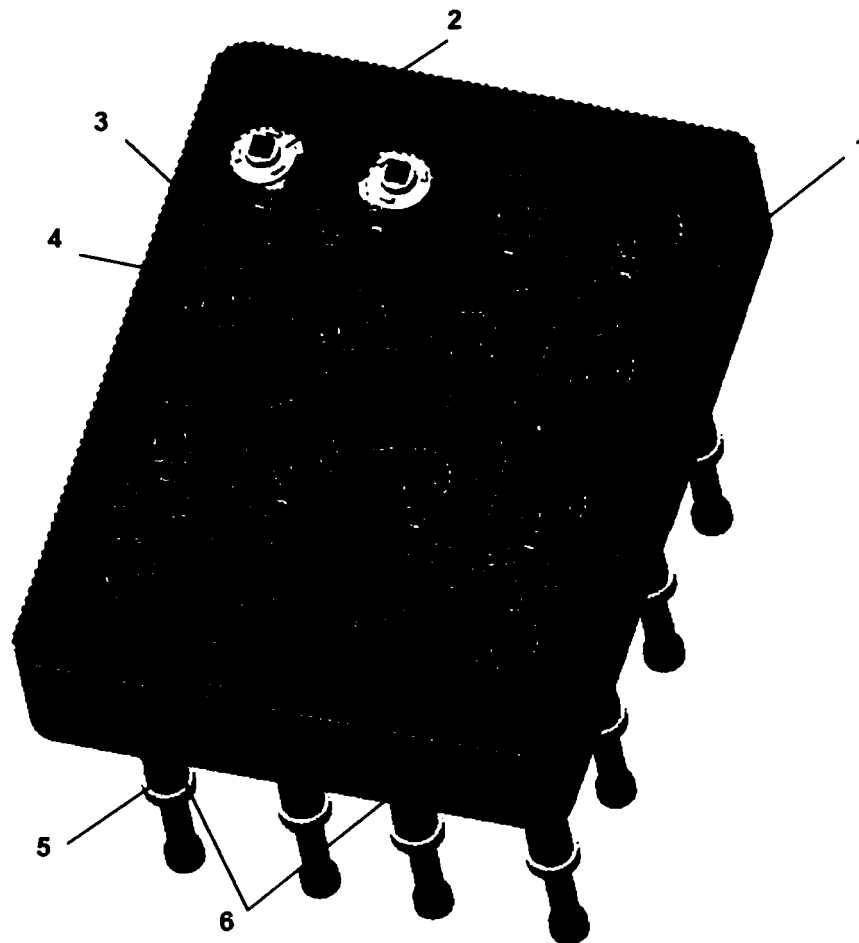


Fig.54 Matrița de turnat sub presiune bucșă- vederea semimatriței mobile; 1 –semimatrița mobilă; 2- piesa (cavitate amprentă); 3- rețea de turnare; 4- miez; 5 – tub de aruncare; 6- canale de răcire.

2.3.3 Tehnologie de obținere a unui capac, suport

Piesa turnată

Subansamblul cutie este format din două repere suport și capac. Cutia face parte din construcția unui corp de iluminat.

Suportul figura 55 este montat fix pe suportul (perete) pe care se montează corpul de iluminat urmând ca legăturile de natură electrică să fie montate pe acest suport. Pentru a masca legăturile electrice pe suport se montează capacul figura 56.

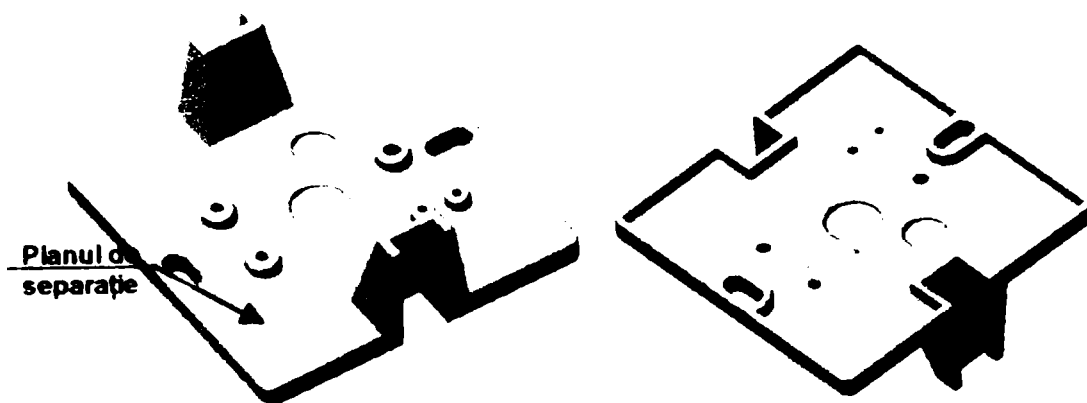


Fig.55 Suport

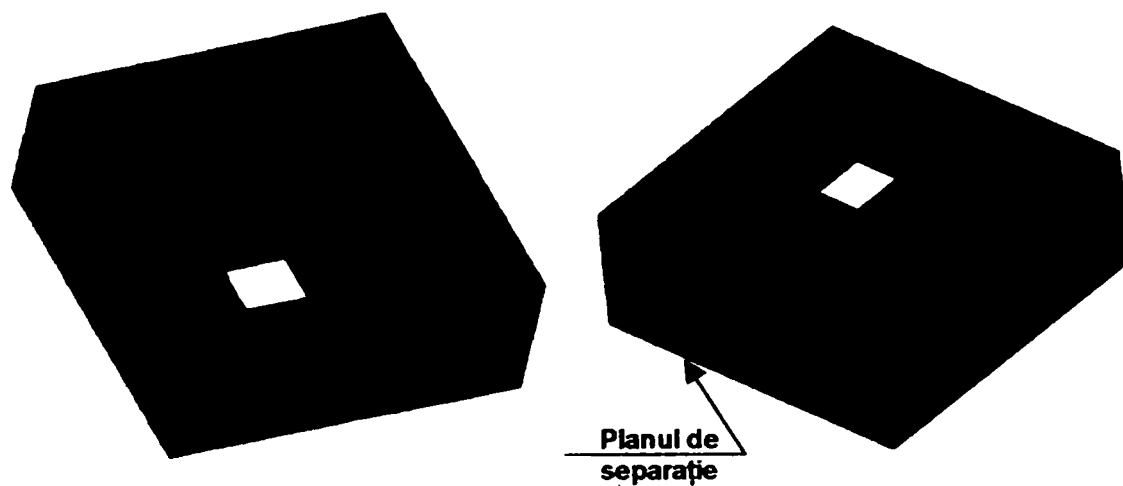


Fig.56 Capac

Materialul din care sunt executate piesele este siluminiu.

Matrița

Având în vedere faptul că cele două repere formează un ansamblu s-a optat pentru obținerea celor doua repere în aceeași matriță figura 57.

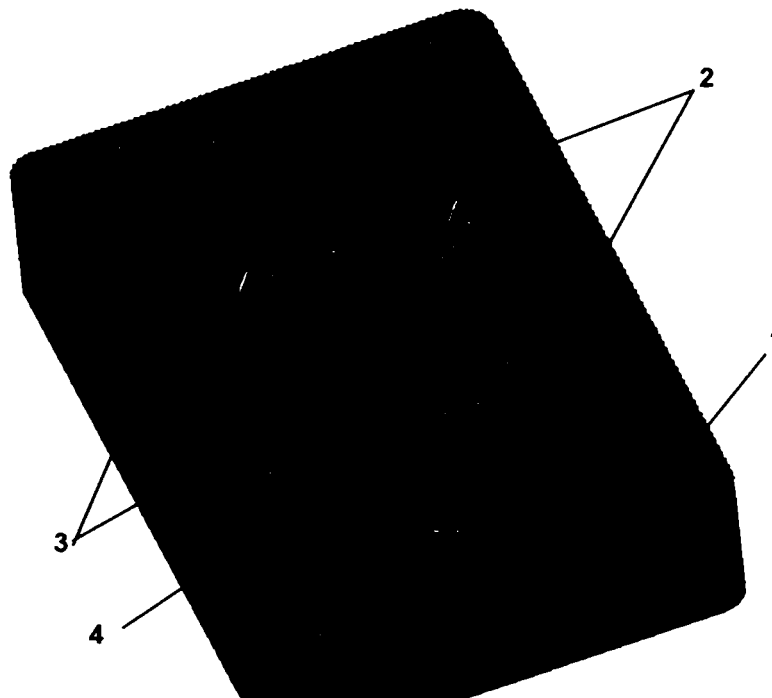


Fig.57 Matrița de turnat sub presiune capac, suport – vederea semimatriței fixe;
 1- semimatrița fixă; 2- cavitate amprentă suport; 3- cavitate amprentă capac; 4- rețea de turnare.

Planul de separație figura 55, 56 s-a ales astfel încât piesa să poată fi extrasă din matriță și să permită obținerea celor două repere în aceeași matriță. În matriță sunt practicate două cavități pentru obținerea a două capace și două cavități amprentă pentru obținerea a două suporturi. Piesele sunt obținute în cavități practicate numai în semimatrița fixă 1 figura 57. Pentru realizarea orificiilor din capac și suport se folosesc miezuri.

În figura 57 este reprezentată piesa 1-suport, miezul-2 care execută orificiul de formă ovală și miezurile 3 cu ajutorul cărora se realizează fanta „a” necesară ghidării capacului în suport. Profilările de pe suprafața b se realizează direct în cavitatea amprentă prin executarea lor direct pe suprafața semimatriței fixe, acest lucru fiind posibil utilizând procedeul de electroeroziune cu electrod masiv. Profilările de pe suprafața opusă sunt realizate cu ajutorul miezului 4 montat în semimatrița mobilă.

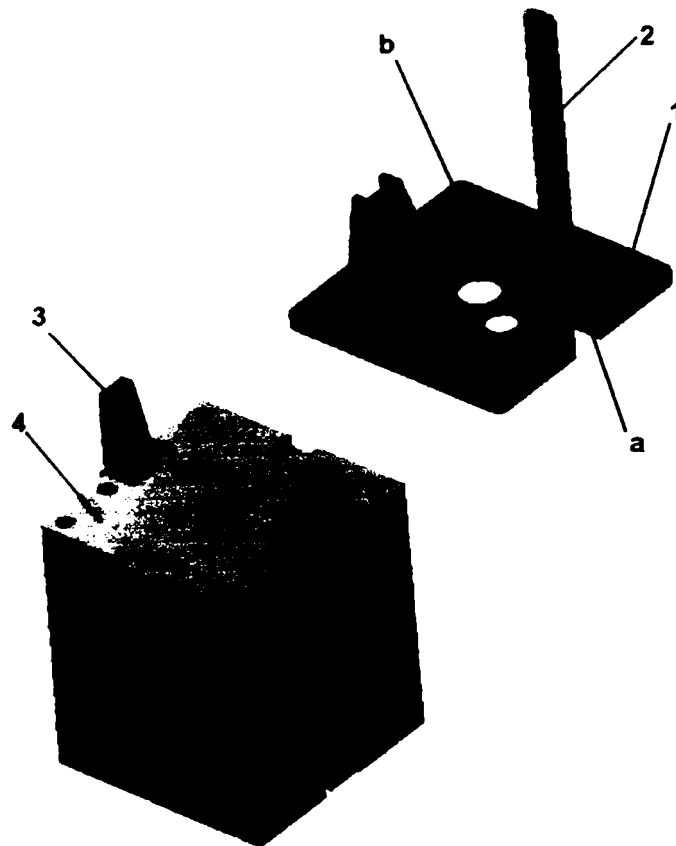


Fig.58 Miezuri utilizate la realizarea suportului;
1-suport; 2,3,4- miezuri.

Alimentarea cavității amprenta se realizează cu ajutorul rețelei de tumare 4 figura 57.

Sistemul de turnare sub presiune

Aliajul topit este împins sub acțiunea presiunii exercitate de pistonul mașinii de turnat sub presiune în cavitățile amprentă 1, 2 figura 57 a matriței prin intermediul rețelei de tumare. La fiecare tumare va rezulta câte două piese din fiecare tip.

Construcția și funcționarea matriței

După umplerea cavităților amprentă și solidificarea aliajului la deschiderea matriței piesele tumate împreună cu rețeaua vor rămâne pe miezurile din semimatrița mobilă urmând ca aruncarea piesei de pe acestea să se realizeze cu ajutorul aruncătoarelor.

În figura 59 sunt prezentate cele două piese turnate sub presiune.

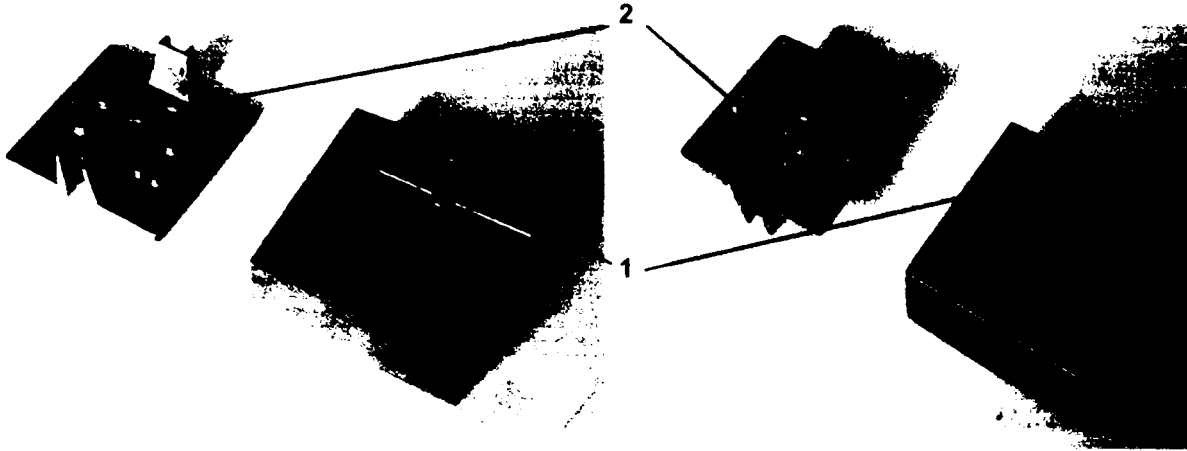


Fig.59 Capac, suport;
1- capac, 2- suport.

2.3.4 Tehnologie de obținere a unui suport corp iluminat

Piesa turnată

Corpul de iluminat prezentat în figura 60 este compus din suport 1, ornament sticla 2, și corpul de iluminat propriuzis 3.

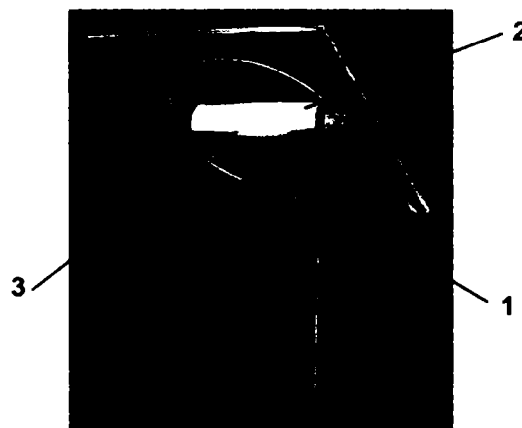


Fig.60 Corp iluminat;
1- suport; 2- ornament sticlă; 3 corp

Suportul 1 figura 60 este compus din două piese și anume suport inferior figura 61 și suport superior.

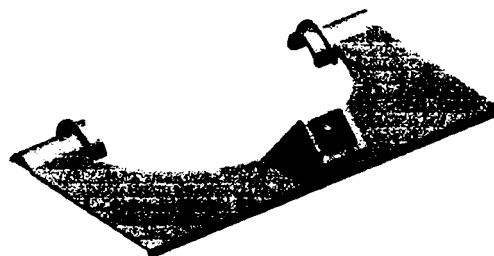


Fig.61 Suport inferior

Aliajul folosit la turnarea sub presiune este siluminiu.

Matrița

Piesele se obțin prin turnare sub presiune într-o matriță cu o cavitate pentru suport inferior și una pentru cel superior figura 62.

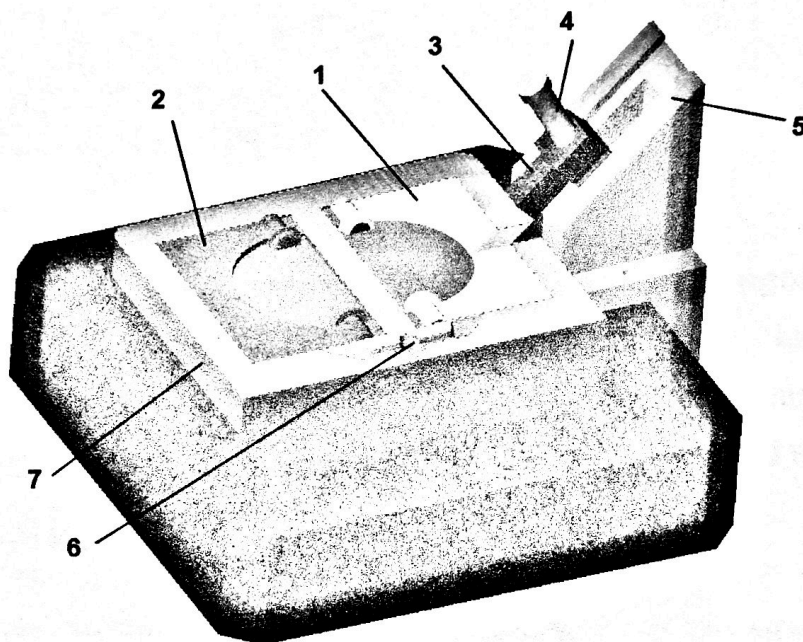


Fig.62 Matrița de turna sub presiune – vederea semiformei mobile;
1- suport inferior, 2 – suport superior, 3- miez mobil, 4- coloană, 5- ghidaj, 6- rețea de turnare, 7- semimatrița mobilă.

Planul de separație se alege conform figurii 63.

Plan de separație

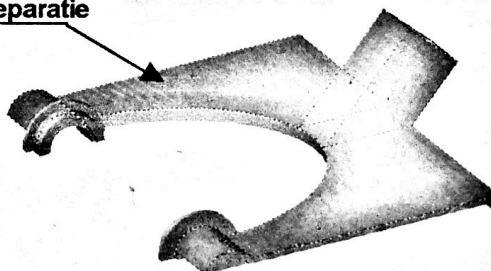


Fig.63 Planul de separație

Alegerea planului de separație conform figurii 63 face ca piesa să se obțină în ambele semimatrițe. Orificiul pătrat existent în suportul inferior figura 61 se realizează cu ajutorul miezului mobil 3 figura 62, care este acționat de către coloana 4 figura 62 montată în semiforma fixă odată cu deschiderea respectiv închiderea matriței. Întrucât

orificiul este așezat la un unghi de 45° cu orizontala miezul mobil se va mișca pe ghidajul 5 având înclinația corespunzătoare.

Proeminențele existente pe una din fețele semiformei inferioare figura 64 sunt realizate prin existența unei profilări corespunzătoare a suprafeței cavității semiformei, profilare realizată prin procedeul de electroeroziune cu electrod masiv.

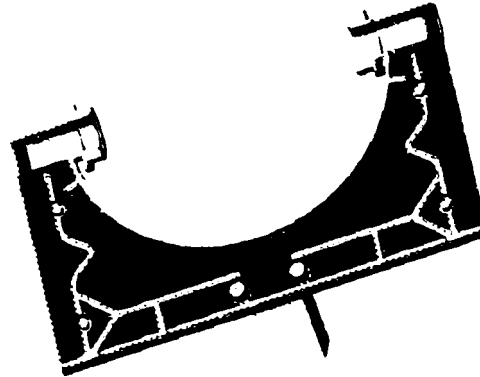


Fig.64 Semiforma inferioară

Alimentarea cu aliaj topit a cavităților formei se realizează cu ajutorul rețelei de turnare 6 figura 62.

Sistemul de turnare sub presiune

Aliajul topit este introdus sub acțiunea presiunii exercitate de pistonul mașinii de turnat sub presiune în cavitatea matriței 1, 2 figura 62 prin intermediul rețelei de turnare 6.

La fiecare tumare rezultă un suport inferior și unul superior.

Construcția și funcționarea matriței

Matrița închisă menține cu ajutorul coloanei 4 figura 62 miezul 3 în poziția în care se realizează orificiul pătrat. După umplerea cavității formei și solidificare, odată cu deschiderea matriței coloana 4 împinge înspre exterior miezul 3 acesta deplasându-se pe planul înclinat realizat de ghidajul 5, realizând în acest fel eliberarea piesei în vederea extragerii acesteia cu ajutorul aruncătoarelor. După turnare la deschiderea matriței piesa rămâne în semimatrița mobilă, de unde este evacuată cu ajutorul aruncătoarelor.

În figura 65 este prezentat suportul inferior turnat sub presiune iar în figura 66 este prezentat suportul superior.

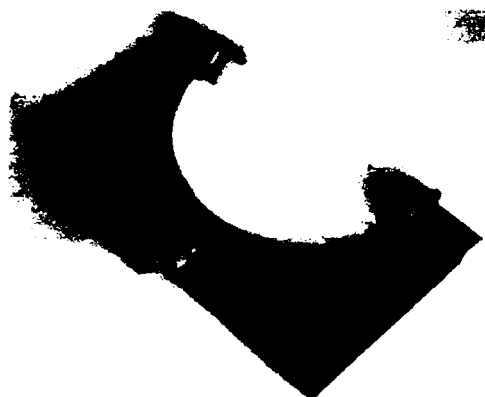


Fig.65 Suport inferior



Fig.66 Suport superior

În figura 67 este prezentat corpul de iluminat asamblat utilizând cele două subansamble obținute prin tumare sub presiune.



Fig.67 Corp de iluminat

Echipamentul folosit în cadrul procesului de turnare sub presiune

3.1 Matrița

Matrița este scula specială a procesului tehnologic de turnare sub presiune. Ea este special proiectată și realizată astfel încât să corespundă piesei.

Figura 68 prezintă o matriță de turnat sub presiune, formată din două ansambluri care se fixează pe platoul mobil și cel fix al mașinii de turnat sub presiune.

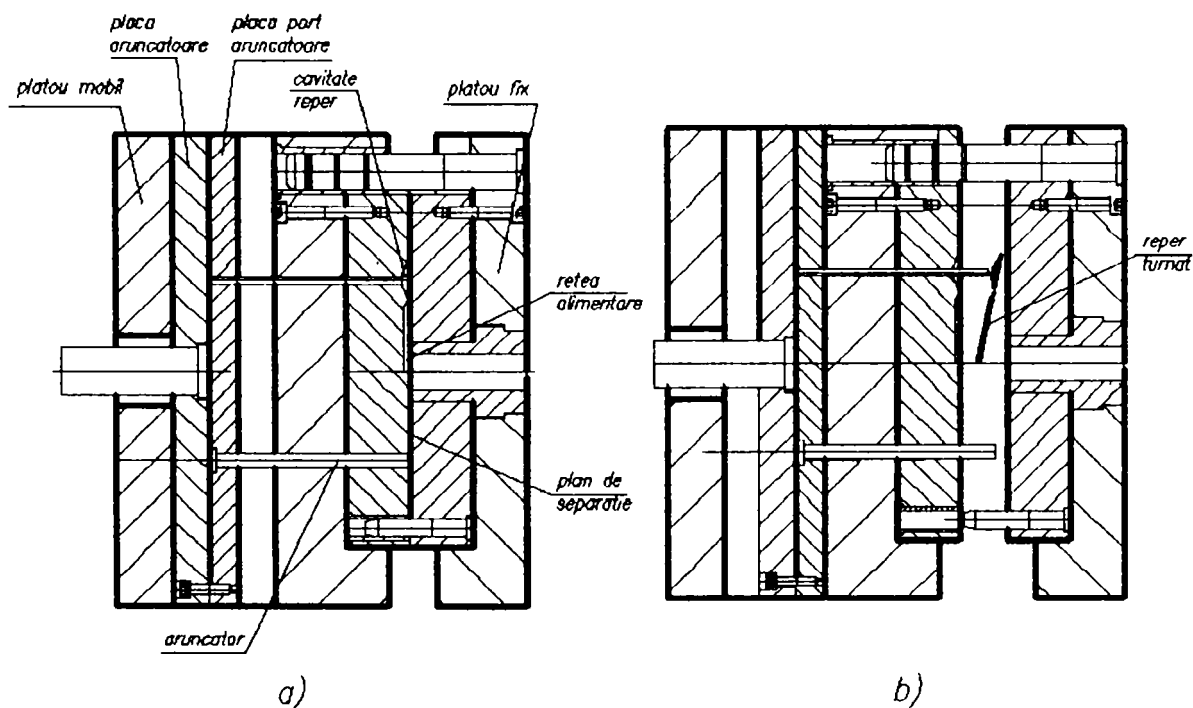


Fig.68 Matriță de turnat sub presiune a) matrița închisă; b) matrița deschisă

Cele două poziții distincte sunt prezentate în figurile a) și b). Cea mai pretențioasă parte a unei matrițe este partea activă, reprezentată de cavitatea matriței (cuibul).

Matrițele se întâlnesc în construcții cu unul sau mai multe cuiburi; acestea din urmă pot produce mai multe repere la un singur ciclu de turnare sub presiune alături de partea activă a matriței, mai sunt și alte părți cu rol funcțional important în procesul de turnare. O matriță trebuie să conțină unu sau mai multe canale de distribuție prin care aliajul topit curge și în final umple cavitatea amprentă.

Sistemul de aruncare este necesar pentru a îndepărta piesa injectată la sfârșitul ciclului. În mod uzual, știfturile aruncătoare îndeplinesc această funcție. Cavitățile amprentă din interiorul matriței este divizată în așa fel de către planul de separație încât, în mod natural, piesa trebuie să se demuleze la deschiderea matriței întâi de pe ansamblul mobil.

3.2 Mașini de turnat sub presiune

3.2.1 Mașini de turnat sub presiune cu piston

Se folosesc pentru turnarea pieselor din aliaje ușor fuzibile.

În figurile 69 și 70 sunt prezentate două mașini cu piston pentru turnarea sub presiune.

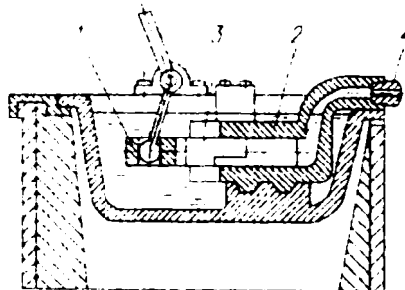


Fig. 69 Mașina cu piston pentru turnarea sub presiune cu cilindru orizontal;
1 – metalul topit; 2 – cilindru de refulare; 3 – piston plonjor; 4 – duza.

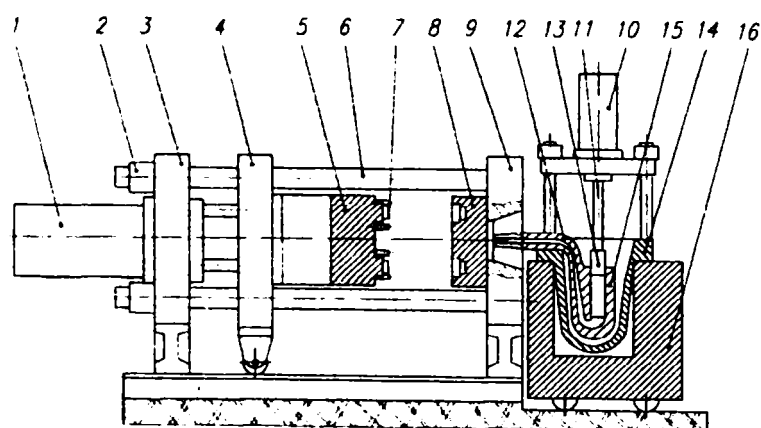


Fig. 70 Mașina de turnare sub presiune cu piston vertical și camera caldă de compresie;
1 – cilindru de închidere; 2 – piuliță rotundă; 3 – placă de capăt; 4 – placă mobilă; 5 – semiforma mobilă; 6 – coloane; 7 – extractoare; 8 – semiforma fixă; 9 – placă fixă; 10 – cilindru de presare; 11 – tijă pistonului; 12 – gât de lebăda; 13 – piston de presare; 14 – creuzet; 15 cameră de presare; 16 – cuptor.

La aceste mașini pistonul presează direct aliajul topit aflat în cilindru și-l împinge în formă. Cilindrul de presare sau camera de presare se află într-o baie metalică. Cilindrul comunică prin intermediul unor orificii de admisie cu baia metalică a rezervorului, iar printr-un canal, cu duza de presare.

Cilindri pot fi dispuși verticali sau orizontali, indiferent de direcția în care se face turnarea.

3.2.2 Mașini de turnat sub presiune cu compresor

La mașinile cu compresor figurile 71 și 72 presiunea asupra aliajului topit este exercitată de către aerul comprimat.

Aceste mașini se construiesc cu cameră deschisă și cu camera închisă. La mașinile cu cameră închisă figura 71 presiunea aerului comprimat se exercită pe întreaga suprafață a aliajului topit, iar la mașinile cu cameră deschisă figura 72 se exercită numai asupra porției de aliaj aflate în camera de presiune.

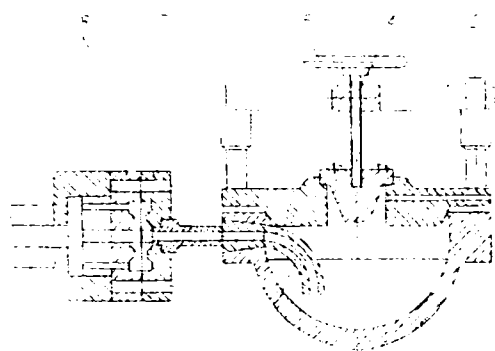


Fig.71 Mașini de turnat sub presiune cu compresor cu cameră caldă închisă;
1 – camera caldă; 2 – capac; 3 – dop; 4 – ax filetat; 5 – manivelă; 6 – ajutor; 7 – tub de injecție; 8 – matrița; 9 - racord

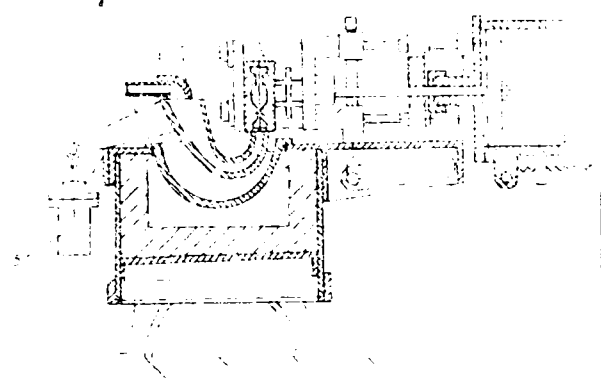


Fig. 72 Mașina de turnat sub presiune cu compresor, gât de lebădă și camera deschisă;
1 – camera caldă deschisă; 2 – gât de lebădă; 3 – matriță; 4 – braț; 5 - cilindru

După metoda de trimitere a aliajului în forme, camerele de presiune pot fi destinate pentru turnarea în direcție verticală sau în direcția orizontală.

Camerele pentru turnarea în direcție verticală se rotesc în jurul unei axe orizontale pentru umplerea cu aliaj.

Camerele cu direcția de turnare orizontală pot fi cu mișcare de translație, oscilantă sau de rotație.

Mașinile cu compresor se folosesc pentru turnarea aliajelor de plumb, zinc, aluminiu și magneziu.

3.2.3 Mașini cu cameră de presare rece

În cazul folosirii mașinilor cu cameră de presare rece, metalul pieselor turnate este mai dens. Aceste mașini se folosesc pentru turnarea aliajelor de aluminiu, alamă, precum și a aliajelor ușor fuzibile.

Mașina funcționează în modul următor: o cantitate de aliaj topit intră în cilindru și sub acțiunea pistonului este presată în formă. Datorită folosirii unei presiuni specifice mărite, aliajele se toarnă la o temperatură mai joasă, datorită acestui fapt conținutul în gaze al topiturii este mai mic decât în cazul unei temperaturii mai înalte.

La mașinile cu cameră de presare rece metalul nu este numai presat în formă, ci și îndesat datorită presiunii.

Metalul, la intrarea în mașină trebuie să fie bine degazat, și forma trebuie să aibe o rețea corectă de turnare și un sistem corect de ventilație.

- **Mașina cu cameră de presare rece verticală**

Mașina cu cameră de presare rece verticală figura 73 se folosește pentru turnarea pieselor din aliaje neferoase pentru producția în serie mare și în masă.

Mașina se compune din două ansambluri principale:

- cilindru de încălzire a formelor;
- cilindru de presare.

Închiderea și deschiderea formelor, precum și presarea aliajului în forme sunt acționate hidraulic.

Mașina este prevăzută cu o stație de pompare de înaltă presiune și un acumulator hidraulic.

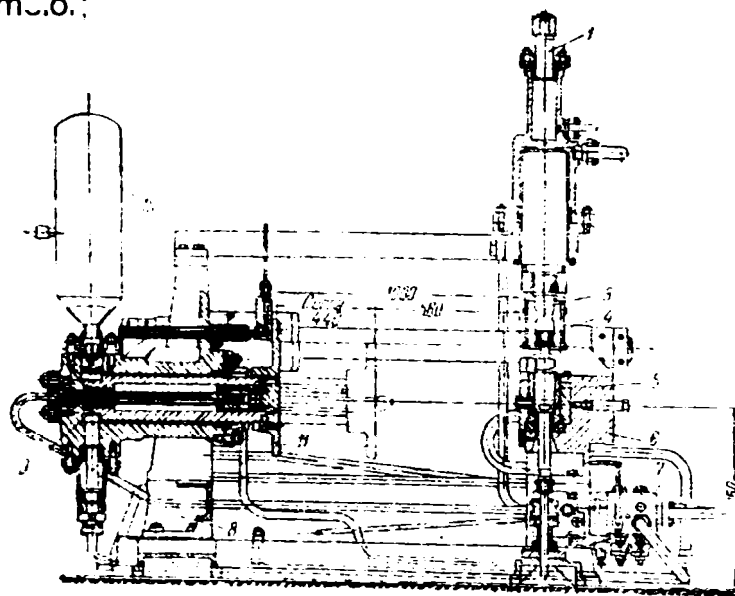


Fig. 73 Mașina de turnare sub presiune cu cameră rece verticală;

1 – piston; 2 – cilindru hidraulic vertical; 3 – piston de presare; 4 – poansonul pistonului de presare; 5 – vasul de umplere al camerei de compresiune; 6 – suportul preseii verticale; 7 – distribuitor principal cu sertare; 8 – suportul preseii orizontale; 9 – cilindru orizontal; 10 – rezervor; 11 – placă de fixare a matriței

În tabelul 11 sunt date caracteristicile principale ale mașinilor cu cameră de presiune rece verticală.

Tab. 11 Caracteristicile principale ale mașinilor de turnat sub presiune cu camera de presare rece verticală

Denumirea	Metalul turnat	Tipul mașinii		
		511	512	513
Greutatea maximă a piesei	Aluminiu și magneziu	0.9	1.8	8.0

- Mașini cu cameră de presare rece orizontală

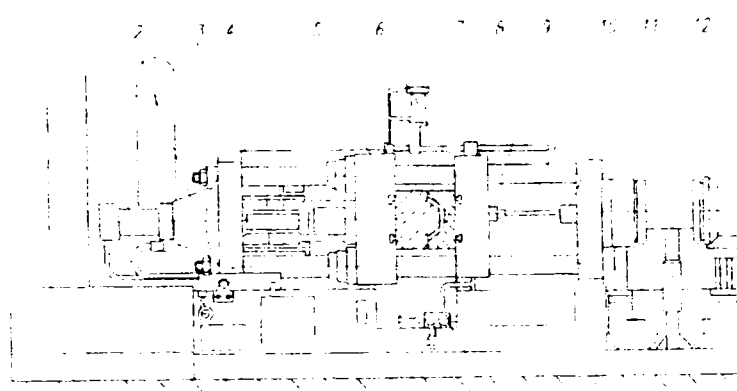


Fig. 74 Mașina pentru turnarea sub presiune cu cameră rece orizontală tip 516:

1 – cilindru hidraulic pentru deplasarea semiformelor; 2 – placa pârghiilor; 3 și 4 piulițe de reglare; 5 – placa mobilă; 6 – cilindru hidraulic pentru extragerea miezurilor; 7 – tija; 8 – placa fixă; 9 – pahar; 10 – piston plonjor; 11 – duza pentru racirea cu apă; 12 – cilindru hidraulic pentru presare; 13 - cutie de distribuție

Mașinile cu cameră de presare rece orizontală figura 74 sunt foarte răspândite, mai ales în cazul când este necesară turnarea unei cantități mari de aliaj în piese de volum mare, pentru care mașinile cu cameră verticală capătă o înălțime mare, ceea ce prezintă mari neajunsuri în exploatare.

La mașinile cu cilindri orizontali este mai ușor de construit rețeaua de turnare și de obținut o repartizare corectă a eforturilor care apar în timpul presării aliajului

Principalele ansambluri ale mașinii sunt:

- mecanismul de apropiere a semiformelor de presare;

- mecanismul de presare;
- echipamentul hidraulic;
- echipamentul electric și aparatajul circuitului de răcire cu apă.

Mecanismul de apăsare deplasează placa mobilă cu una dintre semiformele de presare figura 75 până la îmbinarea cu cealaltă semiformă plasată pe o placă fixă, executând închiderea forme de presare precum și evacuarea piesei turnate din formă în timpul mișcării de retragere.



Fig. 75 Mașina de turnat sub presiune – vederea unei matrițe deschise

Placa mobilă se deplasează pe patru tije de ghidare, fiind acționată de către un cilindru hidraulic, printr-un sistem de pârghii figura 76.

În placa mobilă sunt executate găuri prin care trec tije cilindrice ce deplasează în timpul mișcării de retragere placa împingătorilor formei metalice.

La începutul cursei de presare, atât timp cât cochila nu este umplută în întregime, presiunea este mică, apoi apăsarea exercitată asupra metalului crește, variind automat de la 30 000 la 40 000 kgf.

Umplerea inițială înceată a cochilei este necesară pentru ca aerul care se află în interiorul ei să poată fi evacuat și pentru a proteja împotriva uzurii pereții interiori ai cochilei.

Mecanismul de presare se compune dintr-un pahar de presare, montat într-o placă fixă și un piston plonjor solid, cu un cilindru hidraulic

Mașina are două regimuri de comandă: pe operații și semiautomat.

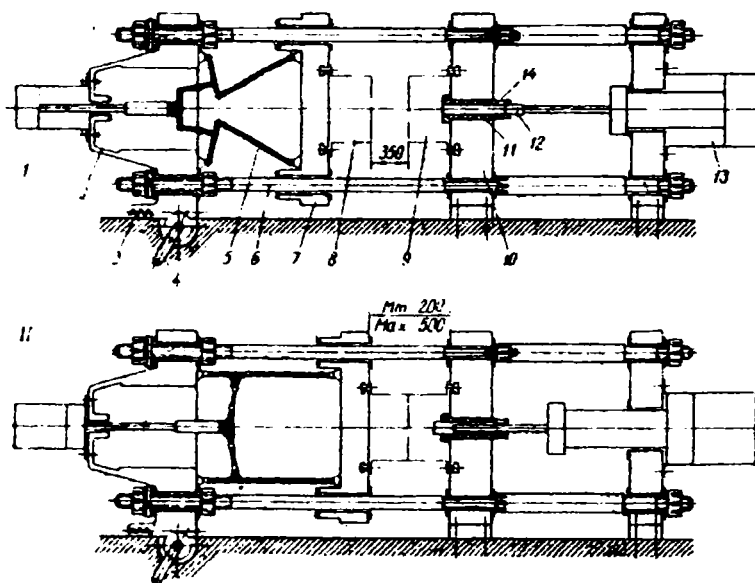


Fig. 76 Schema cinematică a mașinii tip 516:

I forma deschisă; II – forma închisă. Metalul turnat în formă; 1 – cilindru de deplasare a semiformei; 2 – placa pârghiilor; 3 – cremaliera; 4 – maneta de deplasare a pârghiilor; 5 – brațele pârghiilor; 6 – tija de ghidare; 7 – placa mobilă; 8 și 9 – semiforme; 10 – placa fixă; 11 pahar; 12 – piston plonjor; 13 cilindru de presare; 14 fereastră pentru turnarea metalului lichid.

Mașina execută succesiv operațiile necesare pentru obținerea piesei turnate, care încep cu apropierea semiformelor, apoi dacă este necesar se introduc miezurile, după care urmează introducerea metalului lichid, presarea, menținerea pentru răcire, scoaterea miezurilor (dacă acestea există), deschiderea cochilei cu expulzarea piesei turnate, retragerea pistonului de presare, precum și pregătirea formei pentru turnarea următoare.

Optimizarea proiectării produselor din aliaje neferoase turnate sub presiune

4.1 Concepția constructivă și tehnologică

Forma pieselor turnate sub presiune din aliaje se concepe în corelare cu o serie de reguli tehnologice rezultate din restricțiile impuse de natura aliajului, caracteristicile matriței și tipul de mașină utilizată.

Condițiile de utilizare ale piesei determină geometria, dimensiunile, masa ei etc.

Cunoașterea caracteristicilor tehnice generale ale aliajelor topite au determinat fundamentarea unor reguli generale folosite la obținerea unei geometrii corecte a pieselor obținute prin procedeul de turnare sub presiune:

- piesele turnate sub presiune trebuie să aibă forma cea mai simplă posibil;
- dimensiunile și masa piesei trebuie să fie cât mai mici;
- este necesar ca prin configurația piesei să fie îndeplinite condițiile de scoatere a acesteia din matriță;
- configurațiile complicate și proeminențele se evită pe cât posibil pentru a nu complica construcția matriței;
- se evită pe cât posibil, muchiile ascuțite;
- în general se ia în considerare faptul că aliajul turnat își modifică dimensiunile după scoaterea din matriță, influențând precizia dimensională a piesei turnate.

Piese turnate sub presiune se clasifică în ceea ce privește complexitatea [S.1] în trei categorii:

- cu configurație simplă, cu suprafețele netede sau cu nervuri și proeminențe mici și de formă simplă, având înclinări de turnare optime, pe suprafața interioară de 1° și pe suprafața exterioară de $0^{\circ}30'$;
- cu suprafețe rectilinii și curbilinii, cu adâncituri și proeminențe, cu treceri bruște de la pereți subțiri la pereți groși (înclinările de turnare de suprafață interioară $0^{\circ}30' - 10'$ pe suprafață exterioară $0^{\circ}15' - 0^{\circ}30'$);

- cu configurație complexă, cu suprafețele curbilunii și rectilunii de profil complicat, cu număr considerabil de adâncituri, proeminente, nervuri și ferestre, cu orificii adânci de diametre mici (înclinările minime de turnare pe suprafața interioară $0^{\circ}30'$ iar pe cea exterioară $0^{\circ}15'$).

• Planul de separație

Matrița de turnat sub presiune este în principal compusă din două părți, mobilă și fixă delimitată de o suprafață numită plan de separație, în general perpendicular pe direcția de deschidere a matriței. Așezarea piesei turnate în matriță în raport cu planul de separație a matriței este determinată de forma piesei turnate, eliminarea ușoară din matriță a produsului, simplitatea constructivă a matriței.

În figura 77 se oferă câteva exemple de piese turnate sub presiune a căror formă este în concordanță cu planurile de separație ale matriței.

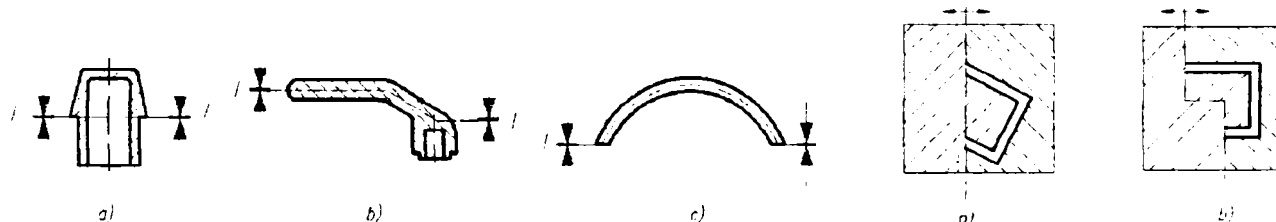


Fig. 77 Planurile de separație ale pieselor turnate sub presiune;
a) – plan de separație simplu; b) – plan de separație în trepte; c) plan de separație după un arc de cerc; l – plan de separație

Fig. 78 Alegerea planului de separație;
a) – soluție nerecomandată; b) – soluție recomandată.

Alegerea planului de separație se face cu o deosebită grijă, deoarece în planul de separație există pericolul apariției bavurilor care influențează atât estetică pieselor cât și funcționalitatea lor.

Așezarea în matriță trebuie să permită o scoatere simplă prin alegerea corectă a planului de separație. În figura 78 se prezintă modul de amplasare recomandabil a planului de separație în funcție de profilul și destinația pieselor.

• Locul de alimentare cu aliaj topit a cavității amprentă

Alegerea locului de injectare este rezultatul analizării mai multor factori restrictivi și anume:

- de natură estetică, datorită faptului că procesul de turnare sub presiune lasă totdeauna o urmă pe suprafața piesei ca urmare a desprinderii produsului de rețeaua de alimentare. Pentru piesele care reclamă condiții de estetică deosebite, locul de alimentare este cât mai mic posibil sau se alege amplasarea lui într-un loc cât mai puțin vizibil figura 79.

- privind curgerea metalului, care determină ca punctele de alimentare să fie plasate astfel încât umplerea cuiburilor să se facă în toate zonele în același timp, evacuarea din cuib fiind asigurată;

- de natură funcțională, care implică ca locul de alimentare să nu se plaseze de obicei pe suprafețele funcționale concomitent cu recomandarea generală ca locul de alimentare să fie plasat pe axele de simetrie ale pieselor.

Pentru o bună dezmembrare a piesei și evitarea rănirii unei porțiuni din piesă se recomandă executarea unei secțiuni critice în zona de alimentare figura 80.

• **Grosimea pereților**

Stabilirea grosimii pereților la piesele turnate sub presiune se face pentru o valoare minimă necesară, care depinde de:

- densitatea și sarcinile la care este expusă piesa turnată;
- forma piesei;
- caracteristicile reologice ale aliajului topit.

În principiu se urmărește ca grosimea pereților piesei turnate să fie uniformă pentru a evita curgerea

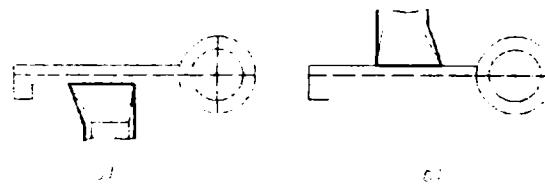


Fig.79 Alegerea locului de alimentare din punct de vedere estetic la turnarea sub presiune; a) corect, b) incorect

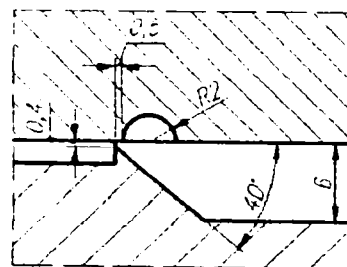


Fig.80 Secțiune critică în zona de alimentare cu aliaj topit

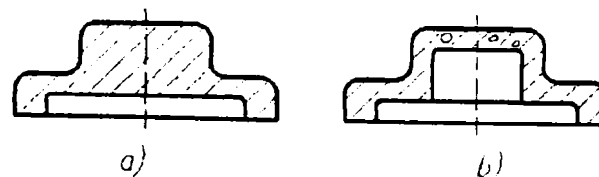


Fig. 81 Exemplu de piesă turnată sub presiune: a) proiectată incorect; b) proiectată corect

turbulentă la tumare, care are drept consecință formarea de goluri, retasuri și apariția tensiunilor interne figura 81.

În figura 82 sunt prezentate soluții constructive pentru piese turnate sub presiune. La proiectarea unei piese nu se poate respecta totdeauna menținerea unei grosimi uniforme a pereților, trecerea de la o grosime la alta se face progresiv figura 5.6 a, b.

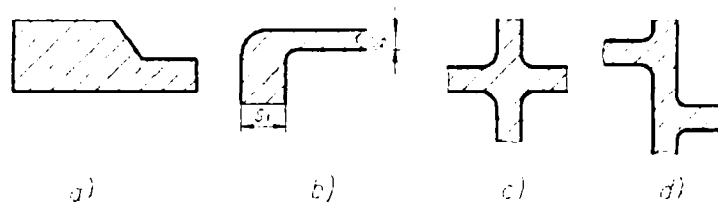


Fig. 82 Soluții constructive pentru pereții pieselor turnate sub presiune.

Formarea nodurilor termice prin aglomerări de material, în cazul pereților groși ai unei piese turnate, determină prelungirea ciclului de turnare ca urmare a măririi timpului de răcire în matrită. Concentrarea maselor de material și formarea “locurilor calde” se realizează mai ales în colțurile piesei figura 82. c, d.

Caracteristica generală a pieselor turnate sub presiuni înalte este grosimea mică a peretelui. În tabelul 12 sunt indicate grosimile minime obținute pentru diferite tipuri de aliaje.

Tab. 12 Grosimi minime de perete obținute la turnarea sub presiune

Nr. crt.	Suprafața maximă a peretelui [cm ²]	Aliaje cu baza de					
		Sn, Pb	Zn	Al	Mg	Cu	Fe
1	<25	0.6	0.8	1.0	1.3	1.5	1.7
2	25 – 100	0.7	1.0	1.5	1.8	2.0	2.2
3	100 – 250	1.1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.2
4	250 – 400	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	-
5	400 - 1000	2	2.5	4.0	4.0	-	-

• Orificii în pereți

Foarte des întâlnite în proiectarea pieselor turnate sub presiune sunt orificiile de diferite dimensiuni având axele paralele cu axa de mișcare a matriței. Aceste orificii sunt simplu de realizat, fie prin intermediul unui miez figura 83, fie în cazul unor orificii adânci, prin intermediul a doua miezuri din ambele părți ale matriței.

Orificiile în pereți pot fi străpunse sau înfundate figura 84.

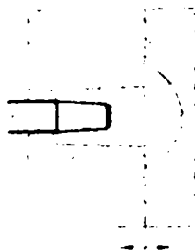


Fig.83 Crearea unui orificiu într-o piesă cu ajutorul unui miez.

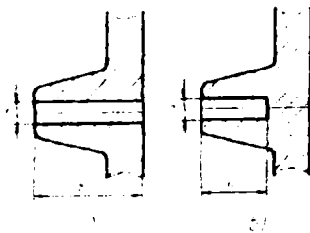


Fig.84 Orificii în pereți pieselor turnate: a) străpunse; b) înfundate.

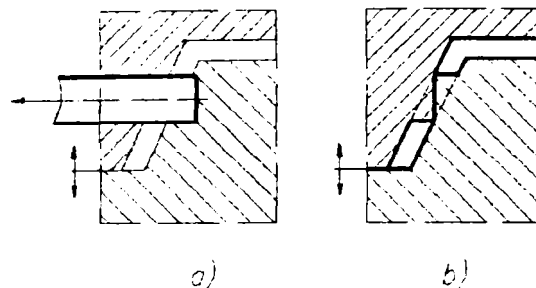


Fig. 85 Soluții constructive pentru realizarea orificiilor în pereții laterali ai pieselor; a)- soluție nerecomandată; b)- soluție recomandată

În figura 85 se prezintă soluții constructive care permit realizarea orificiilor în pereții laterali prin renunțarea la folosirea bacurilor laterale.

Tumarea sub presiune fiind un procedeu de tumare de precizie permite obținerea direct din tumare a găurilor și orificiilor de diametre foarte mici tabelul 13.

Tab.13 Caracteristicile orificiilor și găurilor obținute direct prin turnare, la turnarea sub presiune

Nr. crt.	Aliaj turnat	Diametrul minim Φ_{min} [mm]	Adâncimea maximă a orificiului	
			străpunse	nestrăpunse
1	Cu baza de plumb	1.0	$\Phi_{min} < 1.5\text{mm} - 7\Phi_{min}$ $\Phi_{min} > 1.5\text{mm} - 10\Phi_{min}$	$3\Phi_{min}$
2	Cu baza de zinc	1.0	$6\Phi_{min}$	$3\Phi_{min}$
3	Cu baza de aluminiu	2.5	$4\Phi_{min}$	$2\Phi_{min}$
4	Cu baza de cupru	2.5	$3\Phi_{min}$	$1\Phi_{min}$

• Conicități

Piesele turnate sub presiune se contractă pe miezurile matriței în timpul procesului de răcire în matriță. Acest fenomen implică înclinarea pereților cuibului în vederea scoaterii piesei precum și înclinarea miezului în vederea aruncării din matriță. În figura 86 este prezentat cazul unei piese turnate sub presiune și unghiurile de înclinare.

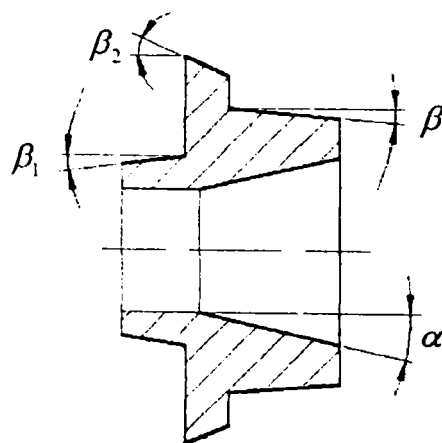


Fig. 86 Unghiurile de înclinare ale unei piese turnate sub presiune; α_1 - unghi de înclinare interioara a peretilor; β_1 - unghiuri de înclinare exterioara ale peretilor.

Se observă că unghiurile de înclinare ale miezurilor și ale pereților piesei sunt orientate diferit în raport cu planul de separație al matriței.

Alegerea diferențiată de către proiectant a acestor unghiuri, poate determina, în cazul unor piese complexe, rămânerea piesei injectate în partea în care sunt dispuse aruncătoarele.

În tabelul 14 sunt date înclinațiile constructive ale pereților perpendiculari pe planul de separație a matriței la turnarea sub presiune.

Tab.14 Înclinații constructive ale pereților perpendiculari pe planul de separație a matriței, la turnarea sub presiune.

Nr. crt.	Aliaj turnat	Înclinația constructivă a peretelui în %	
		La exterior (interfața cu matrița)	La interior (interfața cu miezul)
1	Pb, Sn	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5
2	Zn	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5
3	Al	0.2 – 0.3	0.5 – 1.0
4	Mg	0.2 – 0.3	0.3 – 0.5
5	Cu	0.5 – 0.6	0.5 – 1.0
6	Fe	0.5 – 0.7	0.7 – 1.2

• Nervuri de rigidizare

Pentru creșterea rezistenței mecanice și a rigidizării pieselor turnate sub presiune se proiectează adeseori nervuri de rigidizare. Nervurile de rigidizare se prevăd mai ales la piese cu pereți subțiri. Ele se folosesc atât la consolidarea pereților laterali cât și a fundului piesei.

Pantru întărirea pereților laterali se folosesc, în general, o nervură plană în zona mediană, orientată pe direcția de aruncare a piesei din matriță.

Dimensiunile geometrice pentru o nervură sunt cele recomandate în figura 87.

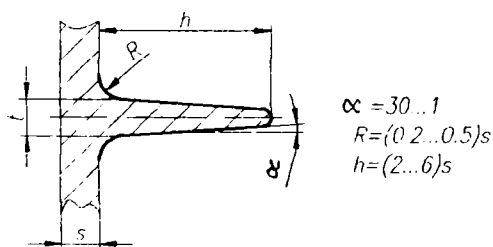


Fig.87 Dimensiuni geometrice pentru o nervură



Fig. 88 Piesă turnată cu inscripționări

- **Profilări de suprafață**

Piesele turnate sub presiune pot fi prelucrate cu suprafața inscripționată. Inscripționările pe piesele turnate pot fi proeminente sau în adâncime, cele mai folosite fiind cele proeminente care se obțin prin gravare directă în matrită figura 88.

În unele cazuri, suprafețele pieselor turnate impun realizarea unor suprafețe matisate, marcaje, decorări de suprafață. Prin folosirea posibilităților de prelucrare a suprafeței matritei, șabloane sau prin electroeroziune, se pot obține efectele dorite.

4.2 Defectele pieselor turnate sub presiune

Defectele cele mai des întâlnite la turnarea sub presiune sunt:

- umplerea incompletă;
- dezaxarea;
- bavura;
- dimensiune necorespunzătoare.

Umplere incompletă – este un defect care se caracterizează printr-o configurație incompletă a piesei, ca urmare a umplerii parțiale a cavității formei cu aliaj.

Defectul se poate descoperi ușor prin control aspectual și se prezintă sub formă de găuri în pereții pieselor, de contur incomplet, de șanțuri sau pereți mai subțiri.

Cauzele care provoacă umplerea incompletă sunt:

- fluiditatea scăzută a metalului sau aliajului turnat care-l face să fie mai puțin mobil și să nu mai pătrundă în toate cavitățile formei;
- alimentarea cu o cantitate insuficientă de aliaj topit;
- construcția greșită a piesei (pereți prea subțiri, ștrangulări exagerate).

Dezaxarea – se manifestă prin deplasarea unei părți a piesei turnate în raport cu celelalte părți, deformându-se contururile sau secțiunile piesei. Defectul se cunoaște prin lipsa de continuitate a suprafeței exterioare sau inferioare ale piesei.

Cauzele acestui defect sunt ghidarea necorespunzătoare a semimatrițelor sau executarea cavităților amprentă în cele două semiforme deplasate una față de alta. Aceste defecte apar la piesele care se formează în ambele semimatrițe figura 89.

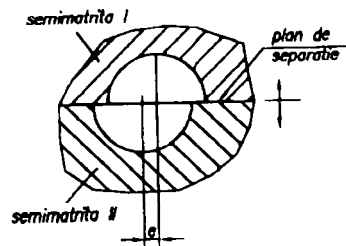
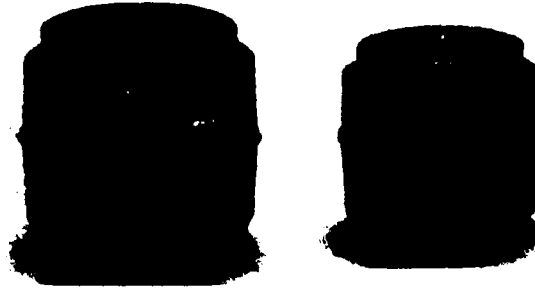


Fig.89 Piesă dezaxată



Bavura – este un defect care apare ca un surplus de material metalic, legat de piesă, în dreptul suprafețelor de separație ale matriței și al miezurilor.

Cauzele care provoacă bavuri sunt:

- jocuri mari între miezuri și semimatrite;
- discontinuitatea contactului între suprafețele celor două forme datorat existenței pe suprafețele acestora a unor impurități (aliaj topit etc.). Acest lucru se întâmplă în cazul necurățirii planului de separație înainte de închiderea matriței.

În figura 90 sunt prezentate două piese cu bavuri.

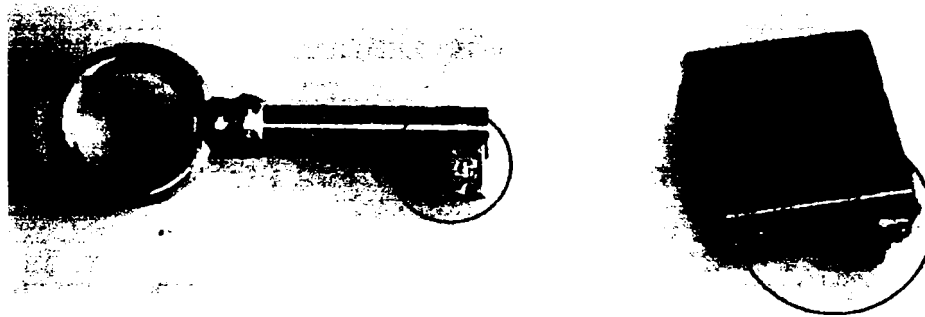


Fig.90 Bavură

Datorită necurățirii suficient de bine a cavității amprentă de eventualele impurități pot apare piese cu defecte datorate acestui lucru prin existența unor goluri pe suprafețele pieselor . fig. 91.

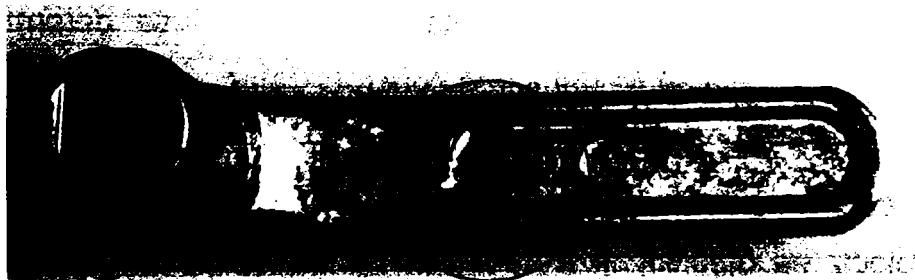


Fig. 91 Piesă cu defect datorat impurităților de pe suprafața cavității formei

Dimensiune necorespunzătoare – este defectul care se manifestă prin abateri de la cotele piesei turnate, abateri care nu se încadrează în toleranțele admise tabelul 15.

Tab.15 Toleranțe admise la turnarea sub presiune

Nr. crt	Mărimea dimensiunii	Aliaje cu baza de			
		Zn	Al	Mg	Cu
1	<25 mm	± 0.250	± 0.275	± 0.275	± 0.370
2	25 ... 500mm ptr. Fiecare mm ce depășește 25mm	± 0.001	± 0.0015	± 0.0015	± 0.003
3	pentru fiecare mm ce depășește 500mm	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.003

Cauzele acestui defect sunt:

- cavitatea amprentă greșit executată;
- contractia greșit aplicată.

O problemă care reclamă o experiență bogată o constituie aprecierea coeficientului de contracție. De multe ori configurația piesei impune să se lucreze cu coeficienți de contracție mai mici sau mai mari, alteleori este necesar să se aplice coeficienți de contracție diferiți la aceeași piesă, pe diferite direcții de solidificare.

4.3 Proiectarea optimală a produselor turnate sub presiune. Procesul de proiectare a unei piese turnate sub presiune

Optimizarea proiectării produselor turnate sub presiune presupune o sincronizare rapidă a modificărilor în întregul ansamblu reper – matrită – tehnologie.

Procesul tipic de proiectare a produselor turnate sub presiune – proces asistat de calculator – constă în următoarele etape [P.7].

1. modelarea 3D a piesei de referință;
2. realizarea conicităților și verificarea acestora, pentru a se determina dacă înclinațiile sunt suficiente ca piesa să fie demulată corespunzător;
3. calculul și aplicarea contracțiilor pe reper;
4. analiza umplerii matritei, pentru a se determina pozițiile punctelor de alimentare, informații utile în proiectarea digurilor și a canalelor de distribuție. De asemenea, se analizează avansul frontului aliajului topit și se obțin recomandări privind viteza pistonului;

5. se adaugă reperului intrările, canalele de distribuție. Ele sunt utile la proiectarea modelului de turnat, cât și pentru verificările de interferență în timpul procesului de deschidere a matriței;

6. se definesc volumele de tumare și suprafețele de separație pentru divizarea semifabricatului în componente separate;

7. extragerea volumelor de tumare din semifabricat și asamblarea acestora în componente ale matriței. Odată extrase componentele de turnat, acestea devin piese independente, care pot fi direcționate spre modulul de desenare, spre modulul de fabricație etc.

8. simularea umplerii cavității de tumare pentru obținerea reperului turnat. Sistemul CAD/CAM/CAE, (CAD – Computer Aided Design, proiectare constructivă asistată de calculator, CAM – Computer Aided Manufacturing – la nivel de execuție, CAE – Computer Aided Engineering, inginerie asistată de calculator), crează reperul de turnat automat, prin determinarea volumului rămas după extragerea volumelor de tumare;

9. se definesc etapele de deschidere ale matriței. Prin simularea deschiderii se verifică interferența cu părțile statice pentru fiecare etapă;

10. se estimează dimensiunile preliminare ale matriței de turnat;

11. se assemblează matrița. O parte din componentele matriței, și anume cele standard, se obțin din bibliotecile electronice corespunzătoare sistemului CAD/CAM/CAE;

12. se realizează desenele de detaliu ale matriței, amplasarea sistemului de tumare sub presiune și sistemul de răcire;

13. se proiectează tehnologia de fabricare pe mașini unelte cu CNC a componentelor matriței.

În figura 92 este prezentat algoritmatizat acest proces de proiectare.

În figura 93 se prezintă o piesă de turnat sub presiune, precum și simularea deschiderii matriței.

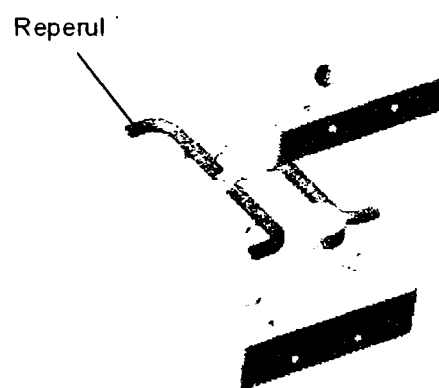


Fig.93 Piesa turnată sub presiune.
Simularea deschiderii matriței.

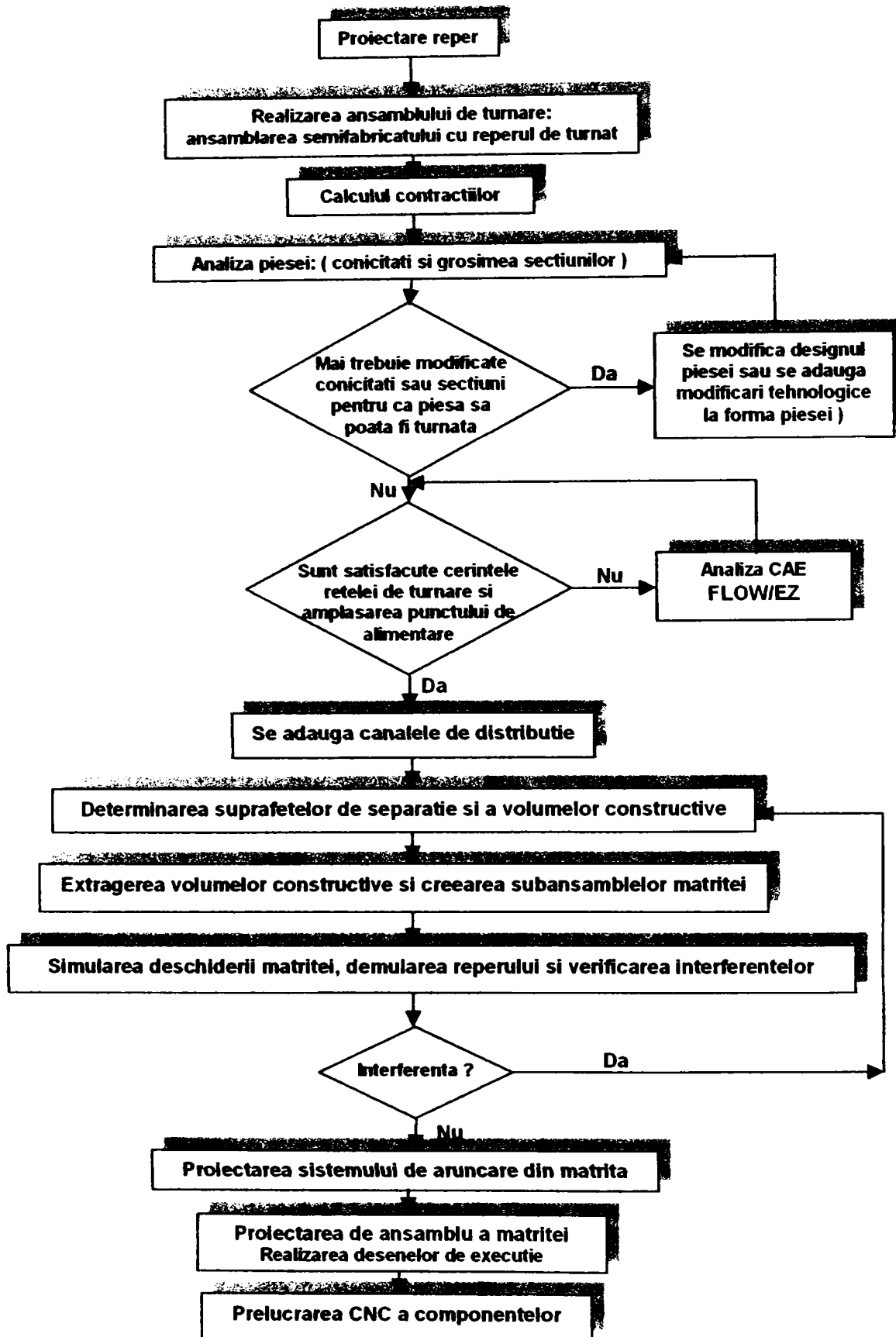


Fig. 92 Procesul de proiectare pentru piese turnate sub presiune

În timpul procesului de proiectare al piesei turnate apar adeseori modificări unele chiar esențiale.

Orice modificare care se produce la nivelul modelului piesei de turnat se propagă în toate aspectele procesului de proiectare, de la modificarea desenelor de execuție, la modificarea modelelor de analiză cu elemente finite, ansamble, până la modificarea programelor CNC.

4.4 Tehnologii de bază utilizate în procesul de proiectare al unei piese turnate sub presiune.

□ Modelul de turnare

Modelul de turnare este de fapt un ansamblu care constă din unul sau mai multe modele ale piesei de referință și unul sau mai multe semifabricate.

Reperul reprezintă produsul final și este utilizat ca bază pentru toate operațiile.

Când piesa este plasată în ansamblul de turnare, ea este înlocuită prin reper, care reflectă de fapt piesa. Datorită acestei relații, orice modificare asupra reperului se răsfrânge asupra piesei.

Reperul prezentat în figura 94 se assemblează cu semifabricatul din figura 95. ansamblul rezultat este prezentat în figura 96.



Fig. 94 Reper

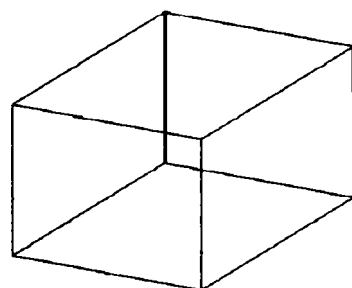


Fig. 95 Semifabricat

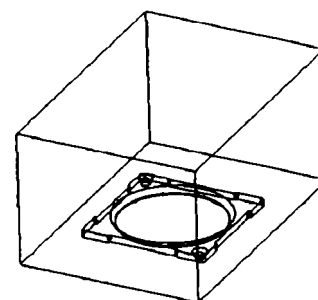


Fig. 96 Ansamblu

Semifabricatul reprezintă volumul acoperitor al componentelor de turnare care participă direct la punerea în formă a aliajului topit. Semifabricatul poate fi format și din două plăci, precum și din miezuri de inserare.

Semifabricatul poate fi de dimensiune standard și utilizat astfel împreună cu bibliotecile HASCO sau poate avea orice dimensiuni date de proiectant, pentru a îndeplini constrângerile piesei.

Figura 96 prezintă modelul de turnare format din ansamblul semifabricat și reper. Pentru matricele cu mai multe cuiburi se pot asambla mai multe repere care formează modelul de turnat, așa cum rezultă din figura 97.

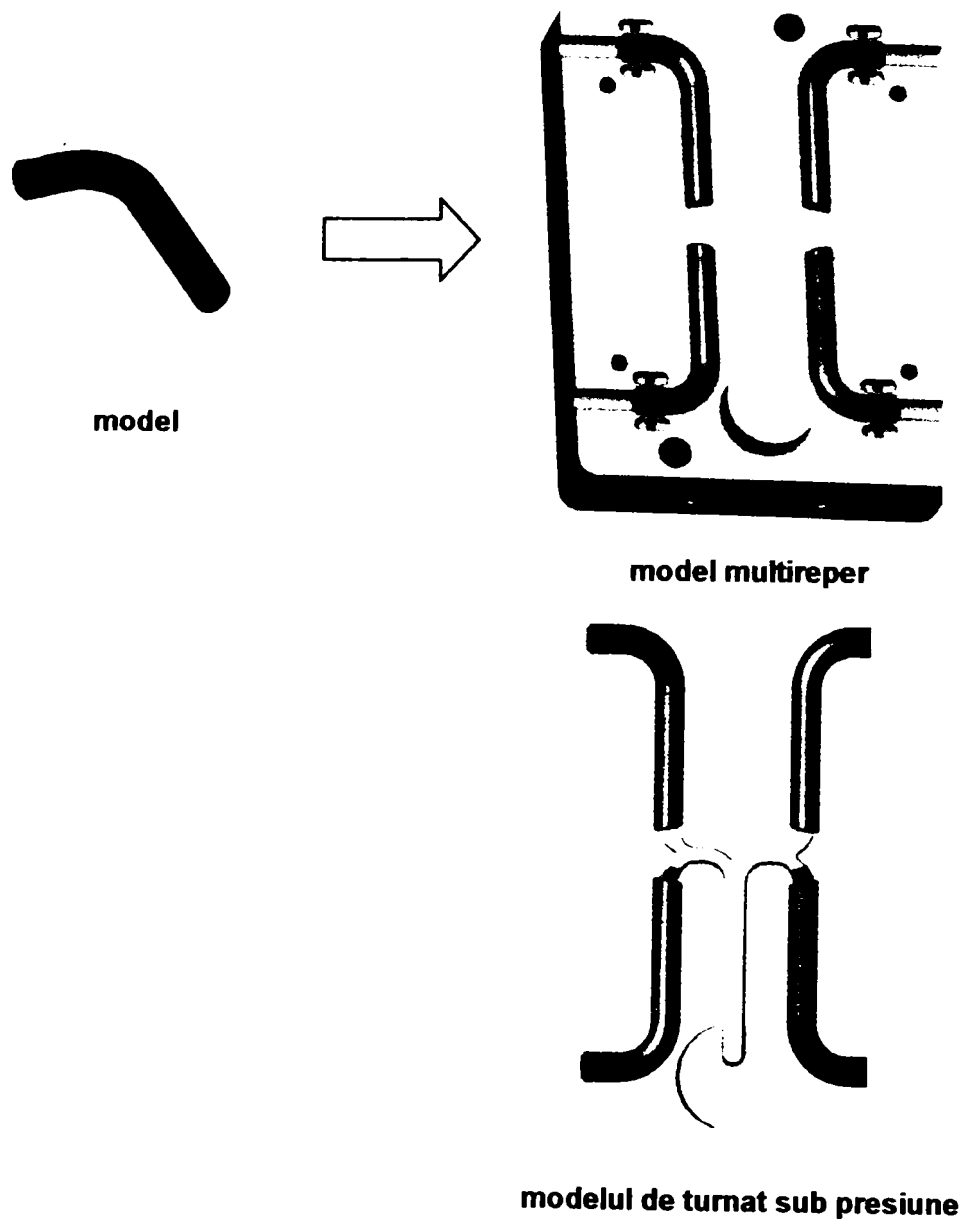


Fig.97 Modelul de turnare

Divizarea semifabricatului după planul de separare și obținerea elementelor active ale matricei este prezentată în figura 98. În această figură se observă și rețeaua de turnare care a fost adăugată reperului.

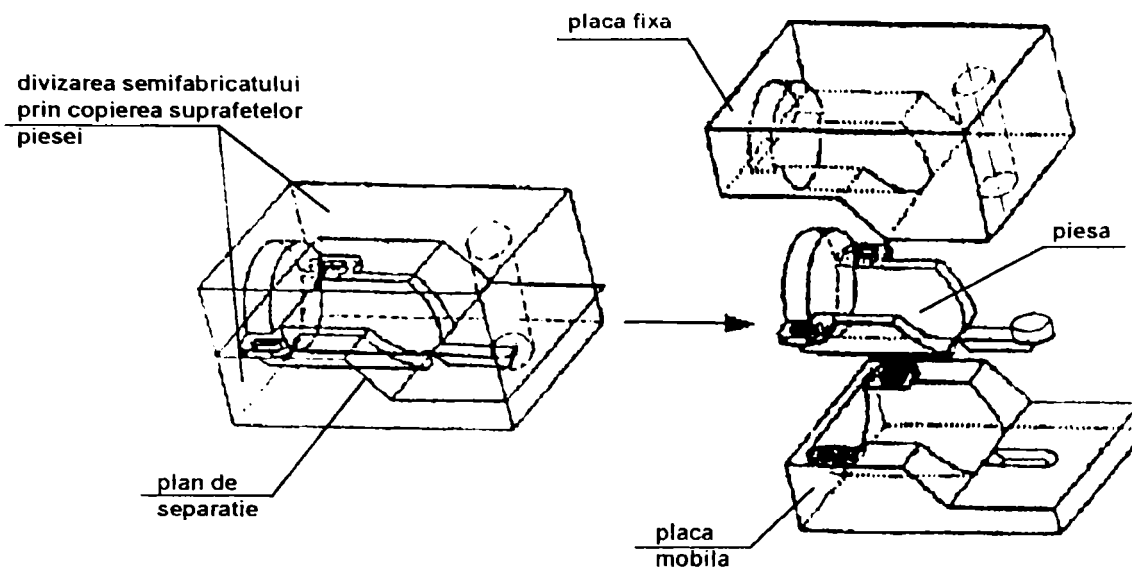


Fig.98 Matrită – elemente active

□ **Contractia piesei**

Înainte de a începe procesul de proiectare a tehnologiei de realizare a unei piese turnate sub presiune, trebuie luate în considerare contractia materialului și mărirea proporțională a dimensiunilor modelului de referință.

Există doua metode de aplicare a contractiilor:

- asupra fiecărei dimensiuni, individual;
- prin scalare, asupra întregii piese.

Deasemenea, contractiile se pot preciza ca factor în funcție de geometria finală pe care trebuie să o satisfacă piesa.

□ **Verificarea conicităților**

Analiza conicităților reperului permite soluționarea problemei evacuării piesei din matrită.

Verificarea conicității minime se bazează pe valorile acestora definite de către proiectant pe piese și pe direcția de extragere, de asemenea definită de proiectant. Pentru a determina care suprafață a piesei corespunde și care nu, sistemul CAD/CAM/CAE compară fiecare dintre normalele la suprafețele piesei cu suprafața de referință.

Suficiența conicităților este prezentată de către sistemul CAD/CAM/CAE în două moduri:

- sub formă grafică:
- sub formă analitică.

Forma grafică prezintă suprafețele reperului într-o paletă de culori alături de o legendă care prezintă cât de mult deviază de la unghiul optim.

□ **Verificarea grosimii pereților piesei**

Ideea constă în simplificarea modului în care se determină dacă pe o anumită regiune grosimea peretelui este mai mare sau mai mică decât o anumită valoare.

Dacă într-o zonă a piesei grosimea pereților este mai mare sau mai mică decât valorile admisibile, acest lucru este prezentat grafic așa cum rezultă și din figura 99.

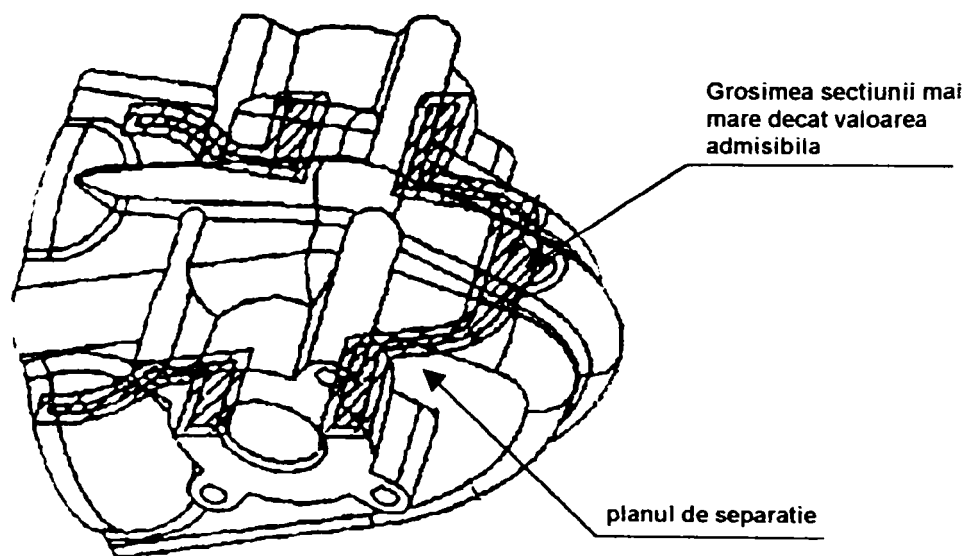


Fig.99 Verificarea grosimii pereților piesei turnate

□ **Proiectarea matrițelor de turnat sub presiune cu ajutorul cataloagelor și bibliotecilor de componente tipizate.**

Bibliotecile electronice care însoțesc sistemele CAD/CAM/CAE oferă componente și ansambluri ale celor mai uzuale firme (HASCO).

Figura 100 prezintă o placă selectată dintr-o bibliotecă electronică de tipizate, la care s-au adăugat elementele active de turnare.

Pentru toate posibilitățile constructive ale matrițelor de turnat, bibliotecile electronice oferă cele mai variate componente tipizate: tije de aruncare, bușe de conducere, șuruburi, plăci de prindere, plăci aruncătoare, plăci portaruncătoare, plăci distanțiere, plăci de formare, etc.

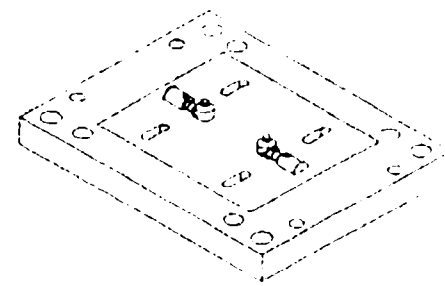


Fig.100 Placă

Elementele active (pastile) și poansoanele care pun în formă aliajul topit primesc evident forma constructivă a volumelor de turnat, prin separarea semifabricatului.

Cele două avantaje majore ale bibliotecilor electronice, sunt:

- proiectarea rapidă a matriței utilizând componente tipizate în cazul în care piesa se încadrează în dimensiunile tipizate;
- modificarea simplă a componentelor tipizate în cazul în care piesa are o geometrie diferită de cea a tipizatelor.

Figura 101 prezintă un ansamblu matriță de turnat, la care s-au folosit componente tipizate din bibliotecile electronice.

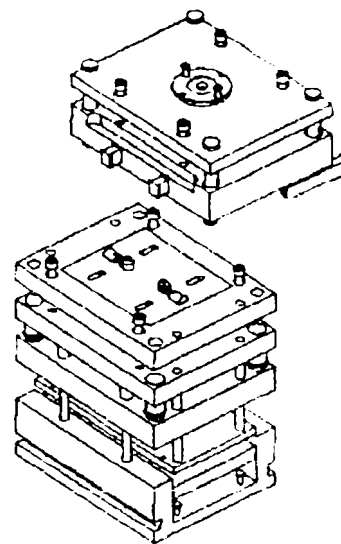


Fig.101 Matriță de turnat sub presiune.

4.5. Definirea modelului FEM al piesei turnate sub presiune

4.5.1 Introducere

Analiza umplerii matriței este o etapă optimală în majoritatea sistemelor CAD/CAM/CAE. Sunt însă și sisteme CAE care se bazează în exclusivitate pe această analiză.

Scopul analizei este acela de stabilire a poziției optime a canalelor de alimentare și de dimensionare a acestora în funcție de piesă. În urma analizei se obțin informații despre goluri de aer, avansul frontului de topire și altele.

Metodologia de realizare a unei astfel de analize este următoarea:

1. analiza geometriei piesei;
2. simplificarea geometriei reale;
3. desfășurarea în plan a piesei;
4. stabilirea numărului de canale și lungimea acestora;
5. construirea imaginii umplerii;
6. evaluarea imaginii umplerii;
7. efectuarea calculelor reologice la drumurile de curgere lungi și pentru pereții cu grosimi reduse;
8. stabilirea pozițiilor pentru canalele de curgere.

Pașii 1 – 8 se introduc într-o structură repetitivă (de tip buclă) până la obținerea optimului

4.5.2 Considerații tehnologice privind curgerea aliajului topit în matriță. Tehnici de modelare computațională.

Drumul de curgere reprezintă calea de minimă rezistență (care duce la scăderea minimă de presiune între punctul de injectare și ultimul punct de umplere, așa numitul drum dominant de curgere)

Din punct de vedere al analizei CAE sunt patru tipuri de curgere utilizate la modelarea fenomenului figura 102:

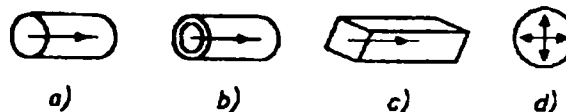


Fig. 102 Tipuri de curgeri: a) circulară; b) inelară; c) rectangulară d) radială.

- curgerea circulară;
- curgerea inelară;
- curgerea rectangulară;
- curgerea radială

Tipul circular este utilizat atât pentru modelarea piesei cât și pentru modelarea canalelor de distribuție.

Tipul rectangular este utilizat pentru modelarea cavității matriței.

Tipul radial este utilizat pentru a descrie curgerea radială care pornește dintr-un punct de injectare central ca de exemplu centrul unui disc.

Există două concepte importante de modelare a umplerii matriței:

- drumul dominant de curgere;

- ultimul punct de curgere.

În funcție de lungimea de curgere a aliajului se poate stabili:

- grosimea minimă de perete pentru un grup de curgere dat;
- dacă cuibul matriței poate fi umplut printr-un singur punct de alimentare sau mai multe;
- dacă presiunea de turnare este suficientă pentru umplerea cuibului.

Grosimea pereților piesei nu poate fi oricât de mică, ea depinzând de capacitatea de curgere a materialului (aliajului topit) și de lungimea pe care aceasta o parcurge.

Cunoasterea grosimii minime a peretelui pentru un anumit parcurs este foarte importantă. Lungimea de parcurs a aliajului topit este în funcție de temperatura aliajului, de viteza de turnare, de sinuozitatea drumului parcurs în matriță și de presiunea de turnare.

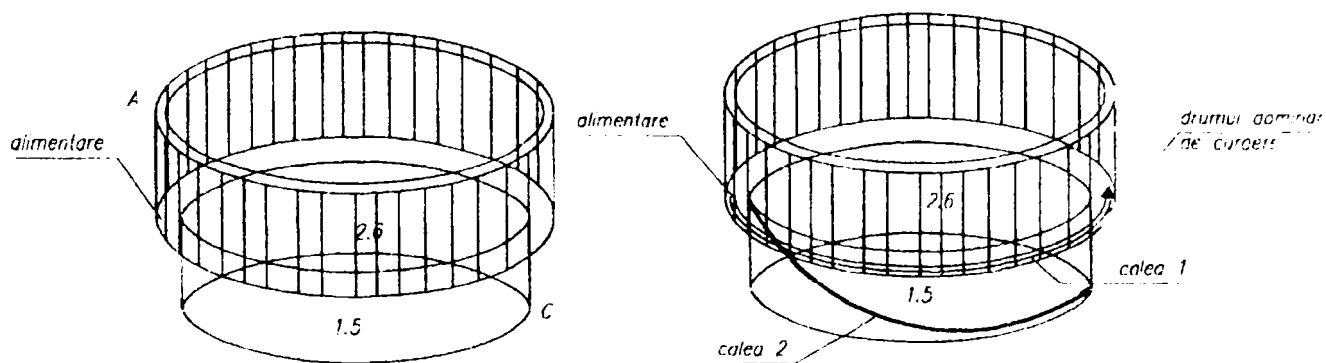


Fig.103 Ultimul punct de umplere

Fig.104 Drumul dominant de curgere

□ Ultimul punct de umplere

Ultimul punct de curgere depinde de poziția punctului de alimentare și de grosimea pereților piesei figura 103. Astfel:

- dacă toți pereții ar avea virtual aceeași grosime, ultimul punct de umplere ar fi punctul cel mai depărtat de punctul de alimentare;
- dacă grosimea pereților este variabilă, ultimul punct de umplere este dictat de calea de cea mai înaltă rezistență la curgere (de exemplu pereți subțiri și distanță mare de punctul de alimentare).

În general ultimul punct de umplere este determinat de calea de cea mai înaltă rezistență la curgere.

Considerând piesa din figura 103 se observă că piesa are pereți de diferite grosimi.

Punctele A, B, C reprezintă trei posibile locații ale ultimului punct de umplere.

Dacă se ia în continuare doar lungimea drumului parcurs de frontul aliajului topit, punctul C figura 103 este cel al ultimului punct de umplere.

Dacă se ia în considerare atât lungimea drumului parcurs cât și grosimea pereților piesei, atunci apar următoarele situații:

- punctul A este foarte apropiat de punctul de alimentare și grosimea de 2.6 mm. a peretelui este foarte mare în comparație cu restul piesei, deci acest punct este exclus;

- punctul B este destul de departe de punctul de alimentare. Pe de altă parte, grosimea peretelui de 2.6 mm reprezintă cel mai gros perete al piesei și deci nu oferă cea mai mare rezistență la înaintarea topiturii. Se exclude și acest punct.

- Punctul C este cel mai îndepărtat de punctul de alimentare și se găsește pe peretele cel mai subțire. Este foarte probabil ca ultimul punct de umplere să fie acest punct.

Din punct de vedere al drumului dominant de curgere figura 104 se prezintă două posibile căi dominante de curgere.

- Cea mai scurtă cale este în întregime în peretele de 1.5mm către ultimul punct de umplere;

- O altă cale se află pe peretele de 2.6 mm și pe urmă coboară pe peretele de 1.5 mm către ultimul punct de umplere.

Este știut faptul că aliajul topit va alege calea de minimă rezistență, dar respectiva cale este dificil de identificat vizual pentru diverse piese.

Între cele două posibile căi (calea mai lungă, dar cu perete mai gros și cea de-a doua calea mai scurtă, dar cu perete mai subțire) frontul de aliaj topit va prefera calea cu perete mai gros și apoi va coborâ către ultimul punct de umplere.

În general, atunci când nu se poate determina vizual drumul dominant de curgere, modelarea pe calculator servește la analiza tuturor variantelor. Drumul dominant de curgere va fi acela care necesită cea mai scăzută presiune de umplere.

4.6 Tehnici de discretizare cu elemente finite

4.6.1 Operații pregătitoare în vederea discretizării

Pentru a analiza felul în care modelul solid al piesei (3D) se umple cu aliaj topit trebuie ca piesa să fie discretizată în elemente finite de tip shell, adică trebuie realizat modelul tip shell al piesei.

Pentru a discretiza cu succes o piesă (sau un ansamblu) trebuie îndeplinite următoarele operații pregătitoare:

- Simplificarea reperului, prin îndepărtarea părților neesențiale din punct de vedere al analizei cu elemente finite;
- Atribuirea unui aliaj reperului de analizat;
- Atribuirea încărcărilor, a constrângerilor și a altor condiții modelului analizat;
- Aplicarea în generatorul automat de discretizare a unui control adecvat cu geometria piesei și a tipului de analiză efectuat;
- Definirea suprafețelor pereche pentru realizarea modelului tip shell;
- Pentru modelele tip ansamblu și pentru piesele non – 3D (așa numitele quilts-suprafețe înfășurătoare) atribuirea contactului între suprafețe.

Pentru realizarea cât mai ușoară a discretizării piesei în elemente finite, piesa trebuie construită din pereți subțiri, nervuri și suprafețe înfășurătoare cât mai multe. Trebuie șterse toate obiectele secundare (racordări, rotunjiri, teșituri, etc).

4.6.2 Obținerea modelului de analiză a umplerii matriței prin discretizarea cavității de umplere în elemente finite tip shell.

Există trei tipuri de discretizare pe care sistemele CAD/CAM/CAE sunt capabile să le realizeze:

- Discretizarea tip pereche;
- Discretizarea tip suprafață;
- Discretizarea tip înfășurătoare.

Discretizarea tip pereche

Părțile perechi ale reperului sunt definite prin precizarea suprafețelor. Odată ce un model satisfăcător a fost definit, se procedează în două faze:

- Modelul de discretizare este creat comprimând suprafețele pe un anumit plan;

- Se aplică discretizarea asupra planului respectiv.

O astfel de discretizare este prezentată în figura 105 [P.7]

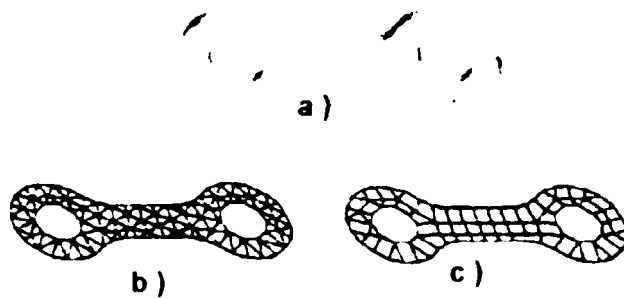


Fig.105 Discretizarea FEM tip pereche.

a) modelul original (piesa); b) discretizarea FEM tip pereche cu elemente triunghiulare; c) discretizarea FEM tip pereche cu elemente cvadruple.

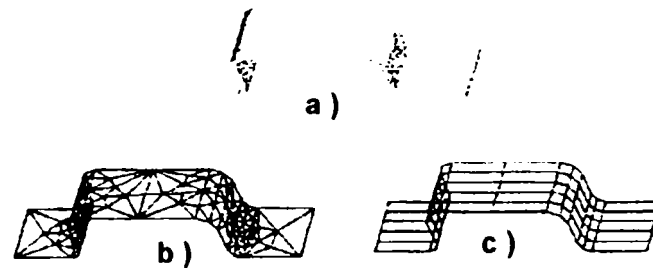


Fig. 106 Modele FEM tip shell

a) modelul original 3D; b) modelul FEM tip shell cu elemente triunghiulare; c) model FEM tip shell cu elemente dreptunghiulare.

Finisarea discretizării se realizează prin alegerea tipului de element de discretizare (triunghi sau dreptunghi). Diferența între cele doua tipuri de elemente în rezultatele discretizării sunt prezentate în figura 106. [P.7]

o Discretizarea tip suprafață

Această opțiune aplică discretizarea cu elemente finite direct suprafețelor piesei. Interiorul piesei nu este discretizat. În cazul când se dorește discretizarea interiorului piesei, trebuie generată discretizarea utilizând elemente 3D de tip teraedric. În figura 107 [P.7] se prezintă un model cu 2 elemente finite tip shell, la care s-a aplicat discretizarea tip suprafață.

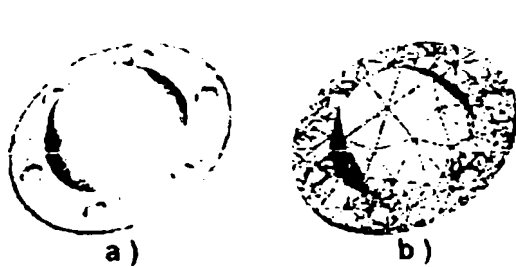


Fig.107 Discretizarea tip suprafață;

a) piesa; b) model FEM tip suprafață.

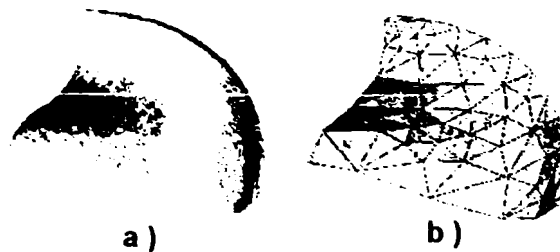


Fig.108 Discretizarea tip suprafață;

a) suprafața originală; b) suprafața discretizată

○ **Discretizarea tip înfășurătoare**

Se aplică o discretizare cu elemente finite tip shell utilizând elemente triunghiulare sau dreptunghiulare asupra suprafețelor înfășurătoare. Părțile solide ale reperului nu pot fi modelate cu acest tip de discretizare.

Discretizarea tip înfășurătoare și realizarea modelului FEM este prezentată în figura 108 [P.7].

4.7. Analiza cu elemente finite FEA

4.7.1 Ideile fundamentale ale Metodei Elementelor Finite (MEF)

În primă fază a dezvoltării sale MEF și-a propus să rezolve problemele fundamentale ale teoriei elasticității, pe baza unei metodologi inspirată din metoda deplasărilor. Ulterior s-a dovedit că MEF poate fi aplicată cu succes în toate problemele în care se impune soluționarea unor ecuații sau sisteme de ecuații cu derivate parțiale.

Ideile principale, care se regăsesc, în orice aplicare, indiferent de problema specifică abordată sunt [B.6] :

1. *Discretizarea domeniului fizic (D)* adică împărțirea acestuia în porțiuni mai mici numite elemente, care pot avea diferite forme (de exemplu în plan: triunghiuri, dreptunghiuri, patrulatere oarecare, triunghiuri cu laturi curbilinii etc.) împărțirea se face pentru a se căuta o soluție a ecuațiilor propuse *nu pentru întregul domeniu, ci pentru fiecare element.*

2. *Aproximarea funcției necunoscute prin ipoteze locale.* Se presupune o ecuație diferențială cuprinzând derivate parțiale ale unei funcții necunoscute $\phi(x, y, z)$. În loc de a se căuta funcția exactă de variație a funcției , ea se înlocuiește printr-o variație aproximativă $\tilde{\phi}(x, y, z)$ aleasă de către utilizator. Cu rare excepții, această aproximație este diferită de forma exactă, dar esențial este faptul că aproximația este locală, adică nu se referă la întregul domeniu studiat, ci doar la un element. Divizarea domeniului într-un număr mare de elemente cu dimensiuni mici, face să se reducă eroarea de determinare a valorilor funcției căutate $\phi(x, y, z)$.

Referitor la funcția de aproximare $\phi(x, y, z)$ trebuie precizate următoarele:

a) $\phi(x, y, z)$ reprezintă o funcție de interpolare, care se poate alege sub forme diferite, dar se preferă cea polinomială;

b) interpolarea se face pe baza valorilor necunoscute $(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)$ din cele n noduri ce limiteaza elementul. Pentru fiecare element acestea pot fi puse sub forma unui vector $\{\phi^{(e)}\}$ al necunoscutelor nodale;

Pentru întreaga structură având NN noduri, se poate defini un vector global al necunoscutelor $\{\phi\}$, cuprinzând NN necunoscute.

3. *Reconstruirea domeniului (D) pe baza informațiilor nodale echivalente.*

Se presupune că se analizează un fenomen fizic descris de relații care permit ca prin derivări parțiale de diferite ordine ale funcției $\phi(x, y, z)$, să se obțină o altă mărime caracteristică pentru fenomenul studiat ce se va nota $C(x, y, z)$. Această funcție C poate deveni purtătoarea de informație a fiecărui element, pe baza căreia se poate reconstrui fenomenul fizic pe întregul domeniu (D). Esențiale pentru procesul de reconstruire sunt următoarele:

a) Transmiterea de informații între elemente se face discret, adică pe baza unor bilanțuri nodale, scrise în toate cele NN noduri. Aceste bilanțuri reprezintă NN ecuații prin a căror rezolvare se determină cele NN necunoscute ale vectorului global $\{\phi\}$:

b) Pentru a se putea scrie bilanțurile nodale, este necesar ca informația furnizată de funcția caracteristică $C(x, y, z)$ care se referă la ansamblul elementului să fie înlocuită prin valorile nodale echivalente.

4.7.2 Scurt istoric

Metoda elementelor finite a apărut ca o necesitate de a studia starea de tensiune și deformație pentru structuri de rezistență de mare complexitate geometrică pentru care calculul se face mai ușor în cazul în care întregul se împarte în domenii mai simple. Datorită caracterului de generalitate al acestei metode, ea s-a extins cu rapiditate aproape în toate domeniile calculului ingineresc care au la bază metodele fizico-matematice de calcul. Deși numele metodei elementului finit a fost introdus recent, conceptul a fost utilizat acum câteva secole în urmă.

Aplicarea metodei elementelor finite sub forma actuală își are începuturile în fundamentarea următoarelor metode și teorii cu aplicații deosebite în inginerie:

- reziduurilor ponderate (Gauss 1795, Galerkin 1915, Biezeno – Koch1923)
- metode variaționale (Rayleigh 1870, Ritz 1909);
- diferențe finite (Richardson 1910, Liebman 1918, Southwell 1940);
- diferențe finite variaționale (Varga 1962);
- testarea continuității funcțiilor pe subdomenii (Courant 1947, Prager – Synger 1947);
- rezoluția prin analogie structurală (Hreikoff 1941, McHenry 1943, Mewark 1949);
- discretizarea în elemente finite a mediilor continue (Argyris 1959, Turner Clough, Martin si Topp 1956);
- introducerea noțiunii de element finit (Clough 1960).

Se poate spune că metoda elementului finit așa cum se cunoaște ea astăzi a fost prezentată în 1956 de către Turner, Clough, Martin și Topp, într-o lucrare în care se prezintă aplicarea metodei elementelor finite simple pentru analiza structurii aparatelor de zbor, fiind considerată una din contribuțiile cheie în dezvoltarea metodei elementului finit. Noțiunea de **element finit** a apărut pentru prima dată în lucrarea lui R. W. Clough în anul 1960, intitulată „Elementul finit în analiza stărilor plane de tensiune „. Zienkiewicz și Cheung au dat o interpretare largă metodei elementului finit și practic semnaleză aplicabilitatea ei la orice problemă inginerescă. Cu această interpretare generală a metodei elementului finit , s-a constatat că de fapt și ecuațiile metodei elementului finit pot fi de asemenea obținute folosind metoda reziduurilor ponderate cum este de exemplu metoda Galerkin.

Calculatoarele numerice au asigurat mijloace rapide de efectuare a unui volum mare de calcule implicate în analiza cu elemente finite și a făcut practic ca metoda să fie aplicabilă. Se poate spune că metoda elementului finit fără utilizarea calculatoarelor numerice de mare capacitate nu ar fi o metodă viabilă.

4.7.3 Tipuri de elemente finite.

Tipurile de elemente finite utilizate în elaborarea modelelor de calcul se deosebesc între ele prin forma lor geometrică, numărul și tipul nodurilor sale, tipul variabilelor de nod precum și tipul funcțiilor de interpolare folosite.

Elementele finite se împart din punct de vedere al principiilor care stau la baza formulării continuității lor în:

- **elemente finite structurale** din care fac parte elementele finite de tip bară și elementele de tip înveliș;
- **elemente finite continue** din care fac parte elementele finite de stare plană și elemente finite tip masiv;

După configurația geometrică elementele finite se împart în următoarele categorii:

1. **Elemente finite unidimensionale** sunt cele mai simple și au o configurație rectilinie sau curbilinie pentru care la capete sunt amplasate nodurile externe sau principale prin intermediul cărora elementele finite se conectează cu elementele finite învecinate figura 109. Elementele finite unidimensionale pot avea unul sau două noduri suplimentare numite noduri secundare plasate echidistant față de extremitățile elementului figura 109 b.

Elementele finite unidimensionale pot aparține unor structuri plane sau tridimensionale.

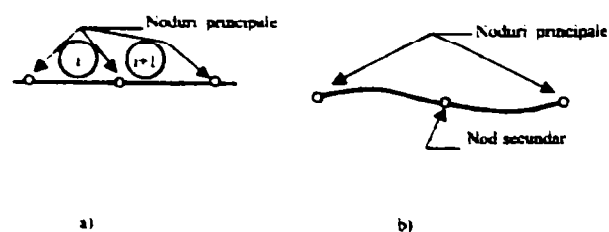


Fig.109 Elemente finite unidimensionale;
a – element finit rectiliniu; b – element finit curbiliniu.

2. **Elemente finite bidimensionale** sunt elementele la care configurația geometrică și parametri asociați se definesc în funcție de două coordonate independente.

Dintre elementele finite bidimensionale cel mai simplu este elementul finit triunghiular figura 110.

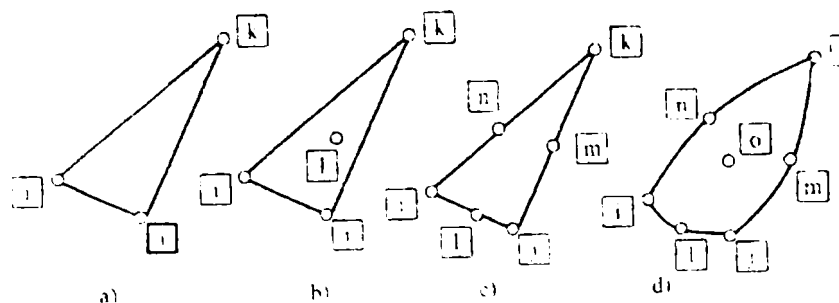


Fig. 110 Elemente finite bidimensionale; a- element finit triunghiular cu trei noduri pe element; b- element finit triunghiular cu un nod secundar interior; c – element finit triunghiular cu noduri secundare externe, plasate pe laturile elementului finit; d- element finit triunghiular curbiliniu, cu noduri secundare externe și un nod secundar intern.

Conecșiunile acestor tipuri de elemente finite cu elemente finite învecinate se realizează prin intermediul nodurilor externe. Nodurile secundare sunt necesare atunci când numărul coordonatelor generalizate depășește numărul gradelor de libertate ale elementului finit.

3.Elemente finite axial simetrice fac parte din categoria elementelor finite uni sau bidimensionale și prezintă un interes practic deosebit întrucât atunci când utilizarea lor devine posibilă se reduce considerabil volumul calculelor. Structurile tridimensionale axial simetrice se reduc la studiul unor probleme unidimensionale sau bidimensionale.

În figura 111 se prezintă câteva cazuri de încărcări axial simetrice.



Fig.111 Încărcări axial simetrice

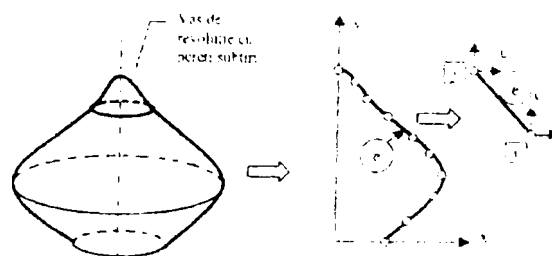


Fig. 112 Studiul stării de tensiune și deformație pentru un vas cu pereți subțiri utilizând elemente finite unidimensionale

În cazul în care structura de rezistență este un vas de revoluție cu pereți subțiri și satisface și condițiile de axial simetrie atunci studiul stării de tensiune și deformație se poate face utilizând elemente finite unidimensionale figura 112.

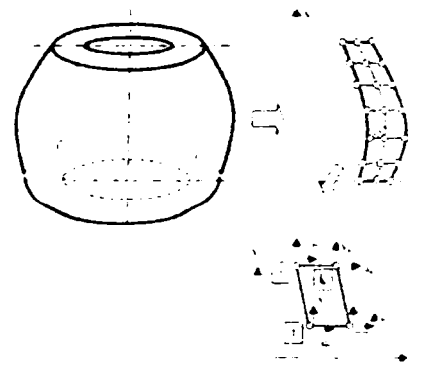


Fig.113 Studiul stării de tensiune și deformație pentru un vas cu pereți groși utilizând elemente finite bidimensionale

În cazul în care structura de rezistență este un vas de revoluție cu pereți groși, problema se reduce la studiul unei secțiuni plane a structurii, figura 113.

4.Elemente finite tridimensionale reprezintă categoria elementelor finite utilizate pentru studiul structurilor de tip masiv sau altor structuri cu pereți groși care nu pot fi modelate cu elemente finite enumerate anterior.

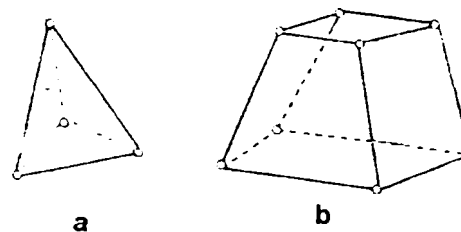


Fig.114 Elemente finite tridimensionale
a- tetraedric; b- hexagonal.

Elementele finite tridimensionale pot fi tetraedrale sau hexagonale, figura 114.

4.7.4 Aproximarea funcției necunoscute prin polinoame de interpolare

Aproximarea se poate face prin funcții de interpolare de diferite tipuri. În tabelul 16 sunt prezentate funcțiile de interpolare de tip polinomial.

Tabelul 16

Cazul unidimensional	
Grad 1	$\tilde{\phi}(x) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x$
Grad 2	$\tilde{\phi}(x) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^3$
Grad n	$\tilde{\phi}(x) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^3 + \dots + \alpha_{n+1} \cdot x^{n+1}$
Cazul bidimensional	
Grad 1	$\tilde{\phi}(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y$
Grad 2	$\tilde{\phi}(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot x^2 + \alpha_5 \cdot xy + \alpha_6 \cdot y^2$
Cazul tridimensional	
Grad 1	$\tilde{\phi}(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z$
Grad 2	$\tilde{\phi}(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z + \alpha_5 \cdot x^2 + \alpha_6 \cdot y^2 + \alpha_7 \cdot z^2 + \alpha_8 \cdot xy +$

4.8 Funcții de interpolare liniare

▪ Funcția unidimensională. Funcții de formă

Se consideră funcția unidimensională $\phi(x)$ din figur. 115 se substituie în domeniul $(x_1 \dots x_2)$ printr-o linie dreaptă, adică printr-o funcție de interpolare liniară de forma:

$$\tilde{\phi}(x) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x \quad (33)$$

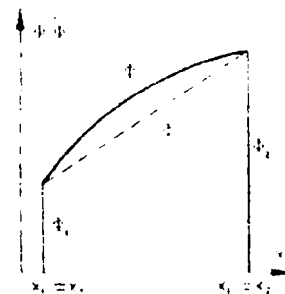


Fig. 115 Funcția unidimensională

Acceptând valorile nodale ϕ_1 și ϕ_2 drept condiții pentru determinarea coeficienților α_1 și α_2 rezultă

$$\begin{cases} \text{pentru } x = x_1 & \tilde{\phi}(x_1) = \phi_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_1 \\ \text{pentru } x = x_2 & \tilde{\phi}(x_2) = \phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_2 \end{cases} \quad (34)$$

Rezolvând acest sistem de ecuații se obțin:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{x_2 \phi_1 - x_1 \phi_2}{x_2 - x_1} \\ \alpha_2 &= \frac{\phi_2 - \phi_1}{x_2 - x_1} \end{aligned} \quad (35)$$

astfel că (33) devine:

$$\tilde{\phi}(x) = \frac{x_2 \phi_1 - x_1 \phi_2}{x_2 - x_1} + \frac{\phi_2 - \phi_1}{x_2 - x_1} x \quad (36)$$

Această relație se poate reordona în funcție de valorile nodale ϕ_1 și ϕ_2 sub forma:

$$\tilde{\phi}(x) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \phi_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \phi_2 \quad (37)$$

Relația 37 permite o formulare deosebit de utilă a funcției de interpolare, în care se separă termenii ce depind de aspectul geometric, de cei ce depind strict de funcția care se interpolează. Dacă se introduc notațiile:

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \quad (38)$$

$$N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (39)$$

funcția 37 se poate pune sub forma:

$$\tilde{\phi}(x) = N_1 \phi_1 + N_2 \phi_2 \quad (40)$$

Funcțiile N_1 și N_2 depind numai de abscisele x_1 și x_2 ce limitează domeniul (D) în care se face interpolarea. Ele reprezintă o descriere pur geometrică a domeniului, independentă de valorile ϕ_1 sau/si ϕ_2 ale funcției ce trebuie interpolată. Din acest motiv N_1 și N_2 se numesc funcții de formă. Împreună, cele două funcții de formă cuprind toate informațiile referitoare la geometria domeniului (D) și a modului de variație al funcției de interpolare.

Valorile nodale ϕ_1 și ϕ_2 sunt cele care dau "personalitate" funcției 40. Acestea sunt mărimi constante, care asigură respectarea condițiilor nodale (relația 34).

Separarea descrisă se poate materializa și printr-o notație specială. Astfel, dacă :

$$[\bar{N}] = [N_1 \quad N_2] \quad (41)$$

$$\{\phi^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} \quad (42)$$

relația 40 se poate scrie:

$$\phi(x, y) = N_1\phi_1 + N_2\phi_2 = [N_1 \quad N_2] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} = [\bar{N}] \{\phi^{(e)}\} \quad (43)$$

unde $[\bar{N}]$ este vectorul – linie al funcțiilor de formă reprezentând partea variabilă, iar $\{\phi^{(e)}\}$ este vectorul coloană al valorilor nodale care cuprinde parametrii constanți ai funcției de interpolare $\tilde{\phi}(x)$. Ca urmare, variația funcției $\phi(x)$ se obține derivând numai pe $[\bar{N}]$

$$\frac{d\tilde{\phi}}{dx} = \frac{d[\bar{N}]}{dx} \{\phi^{(e)}\} = \begin{bmatrix} \frac{dN_1}{dx} & \frac{dN_2}{dx} \end{bmatrix} \{\phi^{(e)}\} \quad (44)$$

deoarece $\{\phi^{(e)}\}$ cuprinde numai valorile constante.

▪ Funcția bidimensională

Funcția bidimensională $\phi(x, y)$ din figura 116 va fi aproximată pe domeniul triunghiular 1-2-3 printr-o funcție de interpolare liniară de forma:

$$\tilde{\phi}(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y \quad (45)$$

Funcția de interpolare va înlocui pe $\phi(x, y)$ printr-un plan care trece prin punctele corespunzătoare valorilor nodale ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ; utilizând aceste valori drept condiții rezultă:

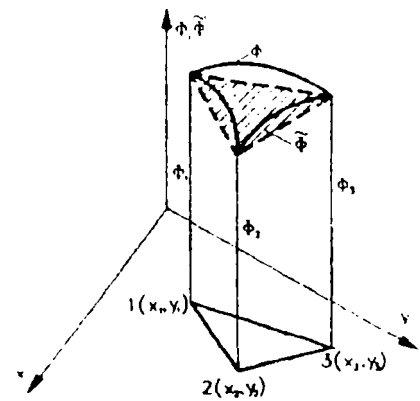


Fig. 116 Funcția bidimensională

$$\begin{cases} \tilde{\phi}(x_1, y_1) = \phi_1 = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1 \\ \tilde{\phi}(x_2, y_2) = \phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2 \\ \tilde{\phi}(x_3, y_3) = \phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3 \end{cases} \quad (46)$$

Rezolvând sistemul de ecuații și introducând notațiile:

$$a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2 \quad b_1 = y_2 - y_3 \quad c_1 = x_3 - x_2 \quad (47)$$

$$a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3 \quad b_2 = y_3 - y_1 \quad c_2 = x_1 - x_3 \quad (48)$$

$$a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1 \quad b_3 = y_1 - y_2 \quad c_3 = x_2 - x_1 \quad (49)$$

coeficienții $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, se calculează cu:

$$\begin{cases} \alpha_1 = (a_1 \phi_1 + a_2 \phi_2 + a_3 \phi_3) / (2A) \\ \alpha_2 = (b_1 \phi_1 + b_2 \phi_2 + b_3 \phi_3) / (2A) \\ \alpha_3 = (c_1 \phi_1 + c_2 \phi_2 + c_3 \phi_3) / (2A) \end{cases} \quad (50)$$

unde s-a notat cu A aria triunghiului 1-2-3 din planul xy , ce se obține dezvoltând determinantul:

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{2} \quad (51)$$

după înlocuirea expresiilor (50) în (46) se obține:

$$\tilde{\phi}(x, y) = N_1 \phi_1 + N_2 \phi_2 + N_3 \phi_3 \quad (52)$$

unde au fost introduse funcțiile de formă:

$$N_1 = (a_1 + b_1 x + c_1 y) / 2A \quad (53)$$

$$N_2 = (a_2 + b_2 x + c_2 y) / 2A \quad (54)$$

$$N_3 = (a_3 + b_3 x + c_3 y) / 2A \quad (55)$$

• Funcția tridimensională

Pentru înlocuirea unei funcții tridimensionale $\phi(x, y, z)$ cu o funcție de interpolare liniară se utilizează forma:

$$\tilde{\phi}(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z \quad (56)$$

Determinarea celor patru constante $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ se face pe baza unor condiții similare celor de la cazul bidimensional, pe baza unor valori nodale ale funcției alegându-se drept domeniu de definiție un tetraedru figura 117.

Funcția de interpolare se poate scrie:

$$\tilde{\phi}(x, y, z) = N_1\phi_1 + N_2\phi_2 + N_3\phi_3 + N_4\phi_4 \quad (57)$$

unde funcțiile de formă sunt:

$$\begin{cases} N_1 = (a_1 + b_1x + c_1y + d_1z)/(6V) \\ N_2 = (a_2 + b_2x + c_2y + d_2z)/(6V) \\ N_3 = (a_3 + b_3x + c_3y + d_3z)/(6V) \\ N_4 = (a_4 + b_4x + c_4y + d_4z)/(6V) \end{cases} \quad (58)$$

În aceste relații V este volumul tetraedrului obținut prin dezvoltarea determinantului:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (59)$$

Pentru prima din relațiile (58) coeficienții se calculează dezvoltând determinanții:

$$a_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (60)$$

$$b_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (61)$$

$$c_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} \quad (62)$$

$$d_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} \quad (63)$$

Pentru celelalte relații coeficienții se obțin prin permutări circulare ale indicilor 1, 2, 3, 4.

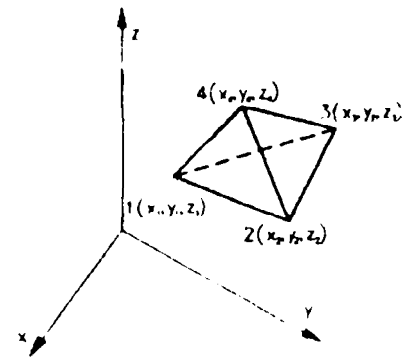


Fig. 117. Funcția tridimensională

4.9 Derivatele funcției de interpolare

Derivarea funcției de interpolare se efectuează ținând seama că se derivează numai partea variabilă, reprezentată de funcțiile de formă.

- **Funcții unidimensionale**

Derivând în funcție de x relațiile (38) și (39) se obține:

$$\frac{d[\bar{N}]}{dx} = \left[\frac{dN_1}{dx} \quad \frac{dN_2}{dx} \right] = \left[-\frac{1}{x_2 - x_1} \quad \frac{1}{x_2 - x_1} \right] = \frac{1}{x_2 - x_1} [-1 \quad 1] \quad (64)$$

- **Funcții bidimensionale**

În cazul bidimensional se vor efectua derivatele parțiale atât în raport cu x , cât și în raport cu y ale funcțiilor de formă date de relațiile (53), (54), (55)

$$\frac{\partial[\bar{N}]}{\partial x} = \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \quad \frac{\partial N_2}{\partial y} \quad \frac{\partial N_3}{\partial z} \right] = \left[\frac{b_1}{2A} \quad \frac{b_2}{2A} \quad \frac{b_3}{2A} \right] \quad (65)$$

$$\frac{\partial[\bar{N}]}{\partial y} = \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \quad \frac{\partial N_2}{\partial y} \quad \frac{\partial N_3}{\partial z} \right] = \left[\frac{c_1}{2A} \quad \frac{c_2}{2A} \quad \frac{c_3}{2A} \right] \quad (66)$$

- **Funcții tridimensionale**

Pentru cazul tridimensional trebuie efectuate derivatele parțiale în funcție de x, y, z .

Utilizând relațiile (5.26) se obține:

$$\frac{\partial[\bar{N}]}{\partial x} = \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \quad \frac{\partial N_2}{\partial x} \quad \frac{\partial N_3}{\partial x} \quad \frac{\partial N_4}{\partial x} \right] = \left[\frac{b_1}{6V} \quad \frac{b_2}{6V} \quad \frac{b_3}{6V} \quad \frac{b_4}{6V} \right] \quad (67)$$

$$\frac{\partial[\bar{N}]}{\partial y} = \left[\frac{\partial N_1}{\partial y} \quad \frac{\partial N_2}{\partial y} \quad \frac{\partial N_3}{\partial y} \quad \frac{\partial N_4}{\partial y} \right] = \left[\frac{c_1}{6V} \quad \frac{c_2}{6V} \quad \frac{c_3}{6V} \quad \frac{c_4}{6V} \right] \quad (68)$$

$$\frac{\partial[\bar{N}]}{\partial z} = \left[\frac{\partial N_1}{\partial z} \quad \frac{\partial N_2}{\partial z} \quad \frac{\partial N_3}{\partial z} \quad \frac{\partial N_4}{\partial z} \right] = \left[\frac{d_1}{6V} \quad \frac{d_2}{6V} \quad \frac{d_3}{6V} \quad \frac{d_4}{6V} \right] \quad (69)$$

4.10. Aplicații ingineresti ale metodei elementului finit

4.10.1 Generalități

Aplicarea metodei elementelor finite s-a impus ca urmare a faptului că poate rezolva cu ușurință probleme a căror complexitate este dată de configurații geometrice complicate, neomeogenități de material, anizotropiei materialelor, materiale compozite, etc.

Caracterul general al metodei elementelor finite o face aplicabilă unei varietăți largi de probleme cu soluții pe contur în inginerie. O problemă cu soluții pe contur este una în care soluția este verificată pe conturul corpului pentru variabile dependente sau derivatele lor ca urmare a impunerii condițiilor prescrise pe contur.

Sunt cunoscute trei categorii majore de probleme cu soluții pe contur, și anume:

a) Probleme de echilibru sau staționare, sau probleme independente de timp. În problemele de echilibru trebuie să găsim deplasarea în starea de echilibru sau distribuția tensiunii dacă aceasta este o problemă de mecanica solidului, distribuția temperaturii sau fluxului de căldură dacă aceasta este o problemă de transfer a căldurii, și distribuția presiunii sau vitezei dacă aceasta este o problemă de mecanica fluidului.

b) Probleme de valori proprii. În probleme de valori proprii timpul nu apare în mod explicit. Acest tip de probleme pot fi considerate ca extensii ale problemelor de echilibru. În plus față de configurațiile corespunzătoare ale stării de echilibru în probleme de valori proprii este necesar să se determine valorile critice ale anumitor parametri care intervin în formulările acestora. În aceste probleme trebuie să găsim frecvențele naturale dacă este vorba de o problemă de mecanica solidului, studiul regimurilor curgerii laminare, dacă este vorba de o problemă de mecanica fluidului și caracteristicile de rezonanță dacă este o problemă de circuit electric.

c) Probleme de propagare sau de tranziție. Probleme de propagare sau tranzitorii sunt probleme dependente de timp. Acest tip de probleme apar, de exemplu, ori de câte ori suntem interesați în găsirea răspunsului corpului care este supus sub sarcini variabile în timp în mecanica solidului deformabil, sau în cazul încălzirii sau răcirii bruște în cazul transferului de căldură.

În tabelul 17 sunt prezentate principalele tipuri de aplicații ingineresti ale metodei elementului finit.

Tabelul 17

Nr. crt.	Domeniul de studiu	Probleme de echilibru	Probleme de valori proprii	Probleme de propagare
1	Inginerie mecanică	Probleme de analiza tensiunilor și deformațiilor din carcasele transmisiilor mecanice, roți dințate, concentratori de tensiune. Analiza tensiunilor din vasele sub presiune, organelor de mașini, materialelor compozite, mecanismelor cu pârghii și angrenajelor, etc.	Frecvențele naturale și stabilitatea mecanismelor cu pârghii, angrenajelor și mașinilor unelte.	Probleme de mecanica ruperii și fisurării sub sarcini dinamice
2	Conductibilitatea termică	Distribuția temperaturii în starea de echilibru în solide și fluide.	-	Curgerea căldurii tranzitorii la ajustajele rachetelor, motoarelor cu combustie internă, paletelor de turbină, carmele și structurile construcțiilor.
3	Domeniul structurilor de construcții civile și industriale	Analiza statică a structurilor de bare articulate, a cadrelor a plăcilor ondulate, a învelitoarelor pentru acoperișuri, pereți de forfecare, poduri, structuri de beton pretensionate.	Frecvențe naturale și modurile proprii ale structurilor. Stabilitatea structurilor.	Propagarea undelor de tensiune. Răspunsul structurilor la sarcinile aperiodice.
4	Geomecanica	Analiza escavațiilor, zidurilor de sprijin, deschidenle subterane și rosturilor de roci și probleme de interacțiune a structurilor cu solul, analiza tensiunii în soluri, baraje, piloni și fundațiilor construcțiilor sau fundațiile mașinilor.	Frecvențele și modurile naturale a sistemelor baraje-rezervor, și probleme de interacțiune structură sol.	Probleme de interacțiune structură sol dependente de timp și infiltrații tranzitorii în soluri și roci. Propagarea undei de tensiune în soluri și roci.

Nr. Crt.	Domeniul de studiu	Probleme de echilibru	Probleme de valori proprii	Probleme de propagare
5.	Ingineria resurselor hidraulice și a apelor. Hidrodinamica	Analiza curgerii potențiale, curgerii libere a suprafețelor, curgerea pe contur a stratului, curgerea vâscoasă și probleme de aerodinamica transonică. Analiza structurilor hidraulice și a barajelor.	Perioadele și modurile naturale ale bazinelor puțin adânci lacurilor și porturilor. Deversarea lichidelor în containere rigide și flexibile.	Analiza curgerii nestaționare a fluidelor și probleme de propagarea undei. Infiltrații tranzitorii în medii acvifere și poroase. Dinamica gazului rarefiat. Curgeri magneto - hidro dinamice
6.	Ingineria nucleară	Analiza vaselor nucleare sub presiune și analiza structurilor recipientelor de siguranță. Distribuția temperaturii în starea de echilibru din componentele reactorului.	Frecvențe naturale și stabilitatea structurilor recipientilor de siguranță. Distribuția fluxului de neuroni.	Răspunsul structurilor recipientului de siguranță al reactorului la sarcinile dinamice. Distribuția nestaționară a temperaturii în componentele reactorului. Analiza termică și vâsco-elastică a structurii reactorului.
7.	Inginerie bio-medicală	Analiza tensiunilor la nivelul protezelor ososase, dinților, sistemului vascular, la nivelul globului ochilor. Mecanica valvelor inimii și capacitatea portantă a implantului.	-	Analiza impactului craniului. Dinamica structurilor anatomice.
8.	Structurile aerodinamice	Analiza statică a structurilor unor nave spațiale, aripilor avioanelor, fuselajelor, și a structurilor de proiectile.	Frecvențe naturale, vibrația aripilor și stabilitatea navei spațiale.	Răspunsul structurilor navei aeriene și spațiale la încărcările aleatorii.

4.10.2 Curgerea potențială a fluidelor incompresibile Ecuția de continuitate

Se consideră curgerea irotațională prin canale plane a unui fluid incompresibil ideal figura 118. se consideră că liniile de curent urmăresc forma canalului și a obstacolelor existente, fără să apară deplasări laterale sau fenomene de turbulență.

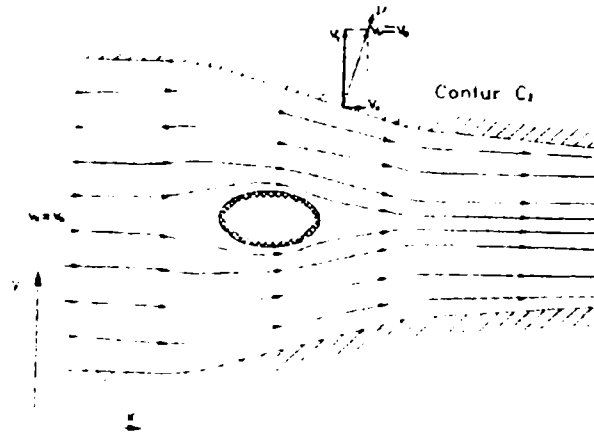


Fig. 118 Curgerea irotațională prin canale plane

- Ecuția de continuitate

Notând cu $v(x,y)$ viteza unei particule de fluid, debitul printr-o suprafață elementară dS este dat de produsul:

$$dQ = v \cdot dS \quad (70)$$

Dacă viteza este constantă pe o suprafață S , debitul se calculează cu relația:

$$Q = \int_S dQ = v \cdot S \quad (71)$$

Se consideră o linie de curent înclinată față de axa x figura 118, viteza $v(x,y)$ a unei particule de fluid este tangentă la linia de curent, deci se poate descompune în componentele v_x, v_y .

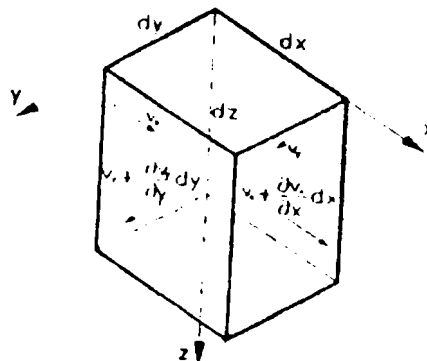


Fig. 119 Element de volum

Se admite o variație a acestor viteze în lungul axelor figura 119 se poate scrie ecuația de continuitate a curgerii pe baza egalării debitului de intrare cu cel de ieșire.

Relatia 70 devine:

$$-v_x dx dz + \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dy dz - v_y dx dz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) dx dz = 0 \quad (72)$$

sau:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (73)$$

Această din urmă relație se poate pune sub o formă simplă, dacă se admite că vitezele se pot obține ca derivatele unui potențial $\phi(x, y)$.

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (74)$$

$$v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (75)$$

În acest caz ecuația de continuitate (73) se scrie sub forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (76)$$

• Condiții la limită

Pentru o problemă descrisă de ecuația (76) se pot pune două tipuri de condiții la limită pe conturul $C=C_1+C_2$, ce mărginește domeniul D.

a) Potențialul să aibă o valoare constantă pe conturul C_1

$$\phi = \phi_c \quad (77)$$

b) Fie ν normala într-un punct oarecare al porțiunii de contur notată C_2 . viteza pe direcția ν se poate exprima în funcție de componentele pe axe v_x, v_y .

$$v_\nu = v_x \cos(x, \nu) + v_y \cos(y, \nu) = \frac{\partial \phi}{\partial x} l_\nu + \frac{\partial \phi}{\partial y} m_\nu \quad (78)$$

unde $l_n = \cos(x, v)$ și $m_n = \cos(y, v)$.

Dacă conturul C_2 coincide cu peretele canalului $v_0=0$, deoarece fluidul nu trece prin perete.

• **Metoda Galerkin**

Se consideră ecuația diferențială a fibrei medii deformată:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (79)$$

Ecuația poate fi generalizată sub forma:

$$L(w) + F(x) = 0 \quad (80)$$

unde L reprezintă un operator diferențial liniar (care în cazul dat este $L = \frac{d^2}{dx^2}$),

iar $F(x)$ este o funcție oarecare de x .

Metoda Galerkin presupune următoarele []:

1. Se alege o funcție $\tilde{w}(x)$ prin care se aproximează deplasarea w

$$\tilde{w}(x) = C_0 f_0(x) + C_1 f_1(x) + \dots + C_n f_n(x) = \sum_{i=0}^n C_i f_i(x) \quad (81)$$

Această funcție, dată sub forma unei sume, cuprinde $n+1$ constante C_i necunoscute, ea trebuie să satisfacă condițiile la limită.

2. Deoarece $\tilde{w}(x)$ este o aproximare a soluției exacte $w(x)$ înlocuindu-se relația (81) în relația (79) se va obține un reziduu (care depinde de constantele C_i), de forma:

$$R = L(\tilde{w}) + F(x) = R(C_0, C_1, \dots, C_n) \quad (82)$$

3. Într-un spațiu vectorial n – dimensional, dacă R este “ vectorul – eroare “ pentru minimizarea acestuia se pune condiția ca proiecția sa pe toți vectorii reprezentați de funcțiile f_i condiții care se exprimă prin anularea celor $n+1$ integrale pe domeniul D ale produsului $R \cdot f_i$ ($i = 0, 1, \dots, n$)

$$\begin{cases} W_0 = \int_D f_0(x) R(C_0, C_1, \dots, C_n) dD = 0 \\ W_1 = \int_D f_1(x) R(C_0, C_1, \dots, C_n) dD = 0 \\ \vdots \\ W_n = \int_D f_n(x) R(C_0, C_1, \dots, C_n) dD = 0 \end{cases} \quad (83)$$

Din condițiile de ortogonalitate (83) se obține un sistem de $n+1$ ecuații având ca necunoscute cele $n+1$ constante C_i ($i=0, \dots, n$).

- **Formularea matricială a metodei Galerkin**

Metoda Galerkin poate fi prezentată sub o forma matricială care permite o adaptare imediată la MEF.

Dacă se definește un vector $\{\bar{C}\}$ care să cuprindă constantele necunoscute

$$\{\bar{C}\} = [C_0 \quad C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_n]^T \quad (84)$$

și un vector $\{\bar{f}\}$ format din funcțiile f_i , care ar avea forma transpusă:

$$[\bar{f}]^T = [f_0(x) \quad f_1(x) \quad f_2(x) \quad \dots \quad f_n(x)] \quad (85)$$

funcția de aproximare (81) poate fi pusă sub forma:

$$\tilde{w}(x) = C_0 f_0(x) + C_1 f_1(x) + \dots + C_n f_n(x) = [\bar{f}]^T [\bar{C}] \quad (86)$$

De asemenea, definim un vector:

$$\{\bar{W}\} = \{W_0 \quad W_1 \quad W_2 \quad \dots \quad W_n\}^T \quad (87)$$

condițiile de ortogonalitate (46) se pot pune sub formă matricială:

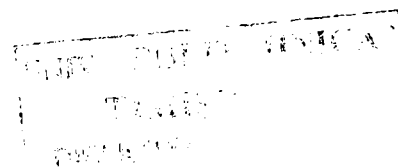
$$\{\bar{W}\} = \int_D [\bar{f}]^T R(C_0, C_1, \dots, C_n) dD = \int_D [\bar{f}]^T \cdot R dD = \{0\} \quad (88)$$

- **Aplicarea metodei Galerkin la studiul curgerii potențiale**

Se consideră domeniul D ca fiind un element triunghiular având aria $A^{(e)} = A$ pentru care se va utiliza funcția de aproximare

$$\tilde{\phi}(x, y) = N_1 \phi_1 + N_2 \phi_2 + N_3 \phi_3 = [\bar{N}] \{\phi^{(e)}\} \quad (89)$$

reziduul va avea forma dată de relația:



$$R = \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial y^2} \quad (90)$$

Condițiile de ortogonalitate (88) devin:

$$\{\tilde{W}\} = \int_D [\tilde{f}]^T \cdot R dD = \int_A [\bar{N}]^T \cdot R dA = \{0\} \quad (91)$$

sau, dezvoltat,

$$W_1 = \int_A N_1 R dA = 0, \quad W_2 = \int_A N_2 R dA = 0 \quad W_3 = \int_A N_3 R dA = 0 \quad (92)$$

transformarea condițiilor de ortogonalitate utilizând integrarea prin părți bazată pe integrala Green conduce la următoarea formă pentru prima relație din (92)

$$\int_A N_1 R dA = - \int_A \left[\frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial y} \right] dA + \int_C N_1 \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} l_v + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial y} m_v \right) dC = 0 \quad (93)$$

Apariția prin transformare, a integralei pe contur C permite includerea în (93) a condițiilor la limită precizate în (77), (78). Pe porțiunea notată C₁ potențialul $\phi = \phi_c$ este constant derivatele sale sunt nule, deci paranteza din ultima integrală este nulă. Pe porțiunea C₂ unde condiția la limită este (78) integrala devine:

$$\int_{C_2} N_1 \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x} l_v + \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial y} m_v \right) dC = \int_{C_2} N_1 v_0 dC \quad (94)$$

condițiile de ortogonalitate sunt:

$$\left[\int_A \left(\frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial [\bar{N}]}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial [\bar{N}]}{\partial y} \right) dA \right] \{\phi^{(e)}\} = v_0 \int_C N_1 dC \quad (95)$$

$$\left[\int_A \left(\frac{\partial N_2}{\partial x} \frac{\partial [\bar{N}]}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \frac{\partial [\bar{N}]}{\partial y} \right) dA \right] \{\phi^{(e)}\} = v_0 \int_C N_2 dC \quad (95')$$

$$\left[\int_A \left(\frac{\partial N_3}{\partial x} \frac{\partial [\bar{N}]}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \frac{\partial [\bar{N}]}{\partial y} \right) dA \right] \{\phi^{(e)}\} = v_0 \int_C N_3 dC$$

Aceste relații pot fi aduse la forma generală:

$$[K^{(e)}] \{\phi^{(e)}\} = \{Q^{(e)}\} \quad (96)$$

- **Expresia generala a matricei $[K^{(e)}]$**

$$[K^{(e)}] = \int_A [B]^T [D] [B] dA \quad (97)$$

unde:

$[B]$ - matricea ce cuprinde derivatele funcțiilor de formă N_i și are expresia:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial [N]}{\partial x} \\ \frac{\partial [N]}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (98)$$

$[D]$ - matricea care descrie proprietățile elastice ale unui material, este – în cazul de față – matricea unitate și are rolul de a conduce la un formalism dat de relația (97).

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (99)$$

- **Expresia generală a matricei $\{Q^{ech}\}$**

$$\{Q^{ech}\} = v_0 \int_{C_2} [N_1 \quad N_2 \quad N_3]^T dC = v_0 \int_{C_2} [\bar{N}]^T dC \quad (100)$$

4.11 Transmisia căldurii în regim staționar. Echivalarea nodală pe baza calculului variațional

4.11.1 Transmisia căldurii prin conducție și convecție

- **Flux de căldură și flux termic unitar**

Transmiterea căldurii între două corpuri sau în interiorul unui corp de la zone cu temperaturi mai ridicate la cele cu temperaturi mai scăzute se face prin conducție, convecție și radiație. Dintre acestea se analizează modalitatea de determinare a

câmpurilor de temperaturi datorită numai convecției și convecției în regim staționar, adică independent de timp.

Analiza se efectuează pe baza fluxului de căldură Q , care reprezintă cantitatea de căldură care trece prin unitatea de timp printr-o suprafață A^* .

$$Q = \int_1 Q \cdot dA \quad (101)$$

unde q este *fluxul termic unitar*. Dacă fluxul unitar este constant pe toată suprafața atunci se poate scrie relația:

$$Q = q \cdot A^* \quad (102)$$

- **Conducție și convecție. Relații empirice**

Conducția este procesul de transmitere a căldurii în interiorul unui corp solid sau între corpuri aflate în contact direct. Dacă se consideră o suprafață izotermă în interiorul unui corp, fluxul termic unitar ce trece pe o direcție normală la această suprafață este dat de relația stabilită de Fourier :

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial v} \quad (103)$$

unde λ este coeficientul de conductibilitate termică determinat experimental; pentru un material anizotrop coeficientul poate avea valori diferite pe direcțiile x , y , z astfel că fluxul termic unitar de-a lungul axelor se va scrie:

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial v} \quad q_y = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial v} \quad q_z = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial v} \quad (104)$$

Convecția este procesul de transmitere prin intermediul unui fluid care se numește agent termic. Procesul de transmitere este descris de relația lui Newton

$$q = \alpha(T - T_a) \quad (105)$$

unde α [$W/(m^2 \cdot h \cdot grad)$] este coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție, care se determină experimental.

T - temperatura unui punct de pe suprafața corpului solid;

T_A - temperatura mediului ambiant (considerată constantă, adică neinfluențată de aportul de căldură provenit de la corpul solid)

4.11.2 Ecuația de transmitere a căldurii prin conducție în regim staționar

Dintr-un corp solid în care are loc un transfer de căldură s-a izolat în figura 120 un element de volum $dV = dx \cdot dy \cdot dz$. Ecuația de echilibru termic în regim staționar se bazează pe egalitatea între fluxurile de căldură ce intră și ies din element.

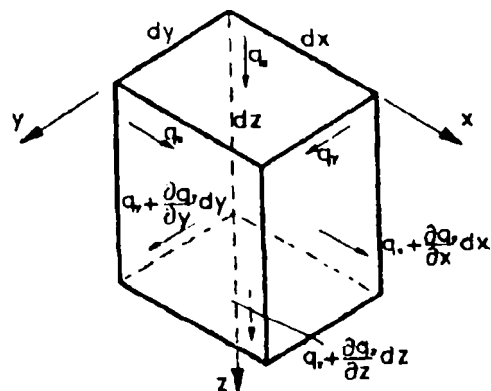


Fig. 120 Element de volum

Fluxul care intră (considerat negativ) este format din cel provenit din exterior (q_x, q_y, q_z) la care se adaugă cel care corespunde unui flux termic pe unitatea de volum \dot{q}_v , care ar putea fi generat în interiorul elementului de o transformare a energiei electrice, nucleare sau chimice în energie termică. Fluxul care iese (considerat pozitiv) se determină admitând o variație între fața de intrare și cea de ieșire a fluxurilor termice.

$$- [q_x dydz + q_y dx dz + q_z dx dy + \dot{q}_v dx dy dz] + \left[\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy dz + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx dz + \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dx dy \right] = 0 \quad (106)$$

după reduceri și simplificări cu $dx dy dz$ rezultă:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - \dot{q}_v = 0 \quad (107)$$

sau, utilizând (67) relația (70) devine:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q}_v = 0 \quad (108)$$

- relația (71) reprezintă ecuația diferențială de transmitere a căldurii prin conducție în regim staționar.

- Condiții la limită

Soluția problemei transmiterii căldurii în regim staționar înseamnă găsirea unei funcții $T(x, y, z)$ care să verifice atât ecuația (109), cât și condițiile la limită, care pot fi figura. 121

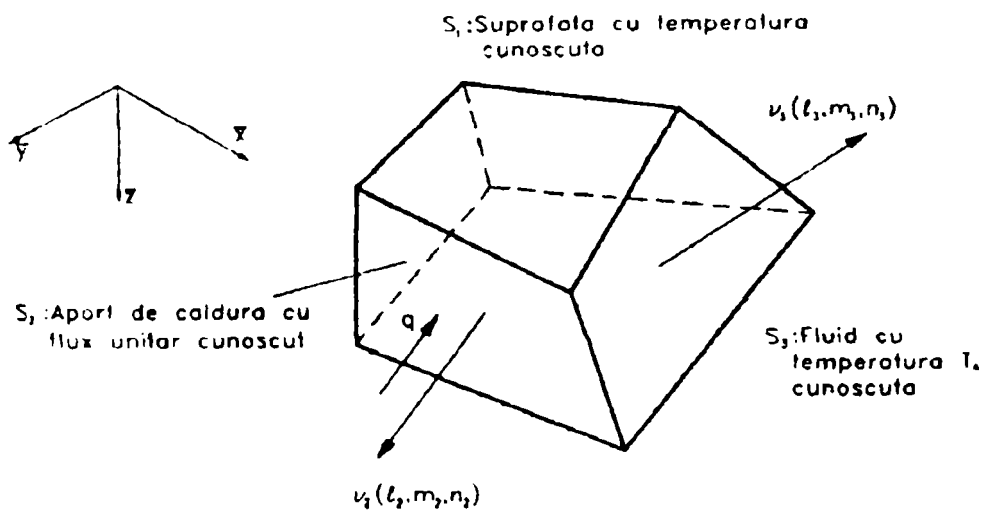


Fig. 121 Condiții la limită

- Pe o suprafață oarecare S_1 se impune o anumită temperatură cunoscută;
- Pe altă suprafață S_2 , având orientarea definită de normala ν_2 (cu cosinusurile directoare l_2, m_2, n_2) pătrunde în corp un flux de căldură unitar cunoscut q . Pe baza relațiilor (66) și (67) rezultă condiția pe suprafața S_2 sub forma:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_2 + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} m_2 + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_2 + q = 0 \quad (109)$$

- Pe suprafața S_3 [normala $\nu_3(l_3, m_3, n_3)$] în contact cu un fluid având temperatura T_A și coeficientul α cunoscute, există un transfer de căldură prin convecție descris de o relație similară cu (73), în care fluxul unitar se determină cu relația (105)

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_3 + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} m_3 + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_3 + \alpha(T - T_A) = 0 \quad (110)$$

4.11.3 Ecuațiile transmisiei căldurii privite ca o problemă variațională

Calculul variațional studiază metodele care permit determinarea extremului funcționalelor. Problemele a căror rezolvare depind de găsirea unor astfel de extreme se numesc *probleme variaționale* [B.6].

Metoda elementelor finite poate fi tratată ca o problemă variațională, pentru rezolvarea căreia trebuie determinat extremul unei funcționale I, definite ca o integrală de forma:

$$I = \int_V F \cdot dV \quad (111)$$

în care: F poate fi dată de o relație de forma :

$$F = F(x, y, z, f, f'_x, f'_y, f'_z) \quad (112)$$

V- volumul corpului pe care se integrează relația (111)

Condiția de extrem se obține anulând variația []:

$$\begin{aligned} \delta I &= \int_V \delta F \cdot dV = 0; \text{ sau} \\ \delta I &= \int_V \left[\frac{\partial F}{\partial f} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial f'_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial f'_y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial F}{\partial f'_z} \right) \right] \cdot \delta f \cdot dV + \int_S \left[\frac{\partial F}{\partial f'_x} l + \frac{\partial F}{\partial f'_y} m + \frac{\partial F}{\partial f'_z} n \right] \cdot \delta f \cdot dS = \\ & \int_{S_1} P_1 \cdot \delta f \cdot dS + \int_{S_2} P_2 \cdot \delta f \cdot dS = 0 \end{aligned} \quad (113)$$

4.11.4 Funcționala al cărei extrem descrie fenomenul de transmitere a căldurii

Fenomenul de transmitere a căldurii poate fi descris prin calcul variațional, adică determinând extremul unei funcționale []:

$$F = \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2q_v T \right] = \frac{1}{2} \left[\lambda_x (T'_x)^2 + \lambda_y (T'_y)^2 + \lambda_z (T'_z)^2 - 2q_v T \right] \quad (114)$$

Expresia propusă pentru F este de forma (75) adică depinde de funcția de temperatură $T(x, y, z)$ și de derivatele acesteia T'_x, T'_y, T'_z .

Condițiile de anulare a variației unei funcționale de forma (112) în care F se înlocuiește cu (114), iar funcția f este reprezentată de $T(x, y, z)$ sunt:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F}{\partial T} &= \frac{1}{2}(-2\dot{q}_v) = -\dot{q}_v \\
\frac{\partial F}{\partial T'_x} &= \frac{1}{2}2\lambda_x T'_x = \lambda_x T'_x; \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial T'_x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x T'_x) = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\
\frac{\partial F}{\partial T'_y} &= \frac{1}{2}2\lambda_y T'_y = \lambda_y T'_y; \quad \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial T'_y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y T'_y) = \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \\
\frac{\partial F}{\partial T'_z} &= \frac{1}{2}2\lambda_z T'_z = \lambda_z T'_z; \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial F}{\partial T'_z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z T'_z) = \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}
\end{aligned} \tag{115}$$

Aceste derivate se înlocuiesc în expresiile P_1 și P_2 așa cum rezultă ele din (113) care apoi se anulează pentru a se asigura condiția de extrem independent de $\delta f = \delta T$

$$P_1 = - \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q}_v \right) = 0 \tag{116}$$

$$P_2 = - \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} m + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n \right) = 0 \tag{117}$$

Din aceste relații rezultă:

a) $P_1=0$ reprezintă ecuația de transmitere a căldurii prin conducție (108);

b) Relația $P_2 = 0$ ar putea descrie condițiile la limită (109) și (110) dar această descriere este incompletă (lipsesc termenii q , respectiv $\alpha(T - T_A)$). Relația (117) este corectă numai în cazul în care $q=0$, adică nu are loc nici un transfer de căldură cu exteriorul. Aceste condiții la limită ce rezultă direct din relația (113) se numesc *naturale*, dar este posibil ca ele să nu descrie complet condițiile fizice pe contur ale problemei analizate. În acest caz forma integrală (111) a funcționalei trebuie modificată.

Funcțională cu condiții la limită forțate. Pentru ca expresia P_2 să descrie condițiile la limită, în forma integrală a funcționalei se introduc încă doi termeni astfel că I capătă forma:

$$I = \int_V \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dV - \int_V \dot{q}_v T dV + \int_{S_2} q T dS_2 + \int_{S_3} \frac{1}{2} \alpha (T - T_A)^2 dS_3 \tag{118}$$

ultimele două integrale referindu-se la suprafețele S_2 , respectiv S_3 figura 121.

Acești termeni adăugați la P_2 conduc la ecuațiile de condiție complete. În acest caz condițiile la limită se numesc *forțate* din cauza adăugării termenilor de mai sus.

În concluzie rezultă că prin anularea variației funcționalei (81) se descrie complet fenomenul de transmisie a căldurii în regim staționar.

• Metoda Rayleigh-Ritz pentru determinarea aproximativă a extremului funcționalelor

Se presupune că se caută o funcție $f(x)$, care trebuie să asigure extremul unei funcționale $I[f(x)]$. Se înlocuiește soluția exactă (necunoscută) printr-o combinație de funcții $f_i(x)$ de forma:

$$\tilde{f}(x) = C_0 f_0(x) + C_1 f_1(x) + \dots + C_i f_i(x) + \dots + C_n f_n(x) \quad (119)$$

Funcțiile $f_i(x)$ trebuie să fie liniar independente și continue pe tot domeniul (D). Ele se aleg în așa fel încât $\tilde{f}(x)$ să satisfacă condițiile la limită pentru orice valori ale coeficienților C_i . (care nu depind de x). Funcțiile $f_i(x)$ pot avea forme foarte variate (polinoame, funcții trigonometrice, funcții Bessel etc.) dar pot fi și de formă simplă în care caz (119) devine:

$$f_i(x) = x^i \quad (120)$$

$$\tilde{f}(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + \dots + C_i x^i + \dots + C_n x^n \quad (121)$$

Dacă se înlocuiește (109) în expresia unei funcționale de forma (111), integrările pot fi efectuate, astfel că se obține o expresie de forma:

$$I = \int_V F[\tilde{f}(x)] dV = I(C_0, C_1, \dots, C_i, \dots, C_n) \quad (122)$$

Valoarea funcționalei depinde acum de C_0, C_1, \dots, C_n , adică $n+1$ coeficienți necunoscuți. Sub această formă problema variațională a fost înlocuită printr-o problemă obișnuită de extrem a unei funcții: trebuie găsite valorile celor $n+1$ coeficienți pentru a se asigura condiția de extrem:

$$dI = \frac{\partial I}{\partial C_0} dC_0 + \frac{\partial I}{\partial C_1} dC_1 + \dots + \frac{\partial I}{\partial C_n} dC_n = 0 \quad (123)$$

relația este satisfăcută independent de variația coeficienților C_i dacă:

$$\frac{\partial I}{\partial C_0} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial C_1} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial C_2} = 0, \quad \dots \quad \frac{\partial I}{\partial C_n} = 0, \quad (124)$$

condiții care constituie un sistem de $n+1$ ecuații din care se obțin cei $n+1$ coeficienți necunoscuți C_i .

Expresia generală a matricii caracteristice

Funcția $T(x, y, z)$ se înlocuiește prin $\tilde{T}(x, y, z)$. Pentru diverse elemente aproximația $\tilde{T}(x, y, z)$ se poate exprima sub forma:

$$\tilde{T}(x, y, z) = [\bar{N}] \{T^{(e)}\} \quad (125)$$

Dacă se notează

$$[K^{(e)}] = \int_V [B]^T [D][B] dV + \alpha \int_{S_3} [N]^T [N] dS_3 \quad (126)$$

$$\{Q^{ech}\} = \dot{q}_v \int_V [N]^T dV - q \int_{S_2} [N]^T dS_2 + \alpha T_A \int_{S_3} [N]^T dS_3 \quad (127)$$

unde []:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (128)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \quad (129)$$

$$\{Q^{(e)}\} = [K^{(e)}] \{T^{(e)}\} - \{Q^{ech}\} \quad (130)$$

4.12 Exemplu de utilizare a metodei elementelor finite la calculul distribuției de temperaturi în cazul răcirii unei piese turnate.

Piesa

Piesa supusă analizei are forma unui paralelipiped având dimensiunile: 52x52x132 mm figura 121.

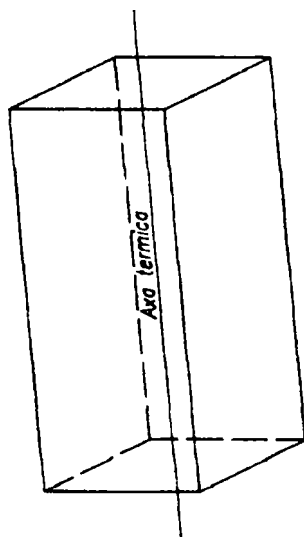


Fig.122 Piesa supusă răcirii cu evidențierea divizării acesteia utilizând simetria

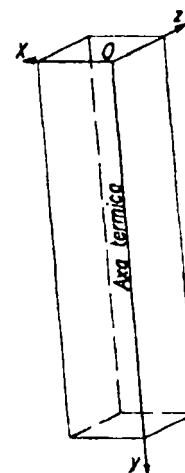
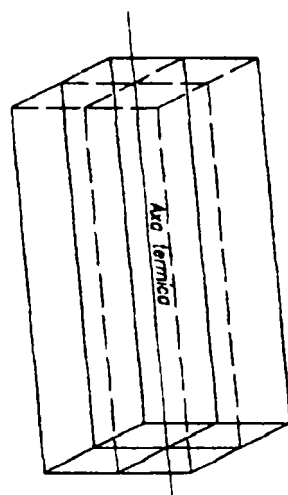


Fig.123 Element rezultat în urma divizării

Materialul utilizat este oțelul având temperatura de turnare de $T_t = 1525^{\circ}\text{C}$. Răcirea piesei se realizează în formă de nisip până la temperatura de $\sim 40^{\circ}\text{C}$.

Modelul de calcul

Transformarea sub formă de model a piesei din figura 121 se face utilizând simetria. Piesa având o formă paralelipipedică prezintă o simetrie atât geometrică cât și din punct de vedere termic față de axa termică a piesei. Se poate realiza o împărțire (divizare) a piesei în patru elemente figura 122.

În continuare este suficient să se studieze doar un element rezultat în urma divizării figura 123 punând unele condiții care să garanteze simetria.

Modelarea așezării piesei în formă

Piesa fiind turnată în lingotieră cu coeficientul de acumulare a căldurii mare, oțelul având o conductivitate termică ridicată rezultă că prin suprafețele de contact piesă-formă egale se transmite aceeași cantitate de caldură.

Suprafața liberă a aliajului (în contact cu aerul) are temperatura cea mai mare ținând cont de direcția de umplere a lingotierei.

Modelarea proprietăților de simetrie

Pentru cazul studiat simetria poate fi descrisă corect dacă se consideră că în axa termică temperatura are valoarea cea mai mare în orice moment al răcirii piesei.

Pe de altă parte asupra unei părți rezultate în urma divizării piesei inițiale se propagă a patra parte din cantitatea de căldură care se transmite în lungul axei oy respectiv jumătate din cea care se transmite în lungul axei ox figura 124.

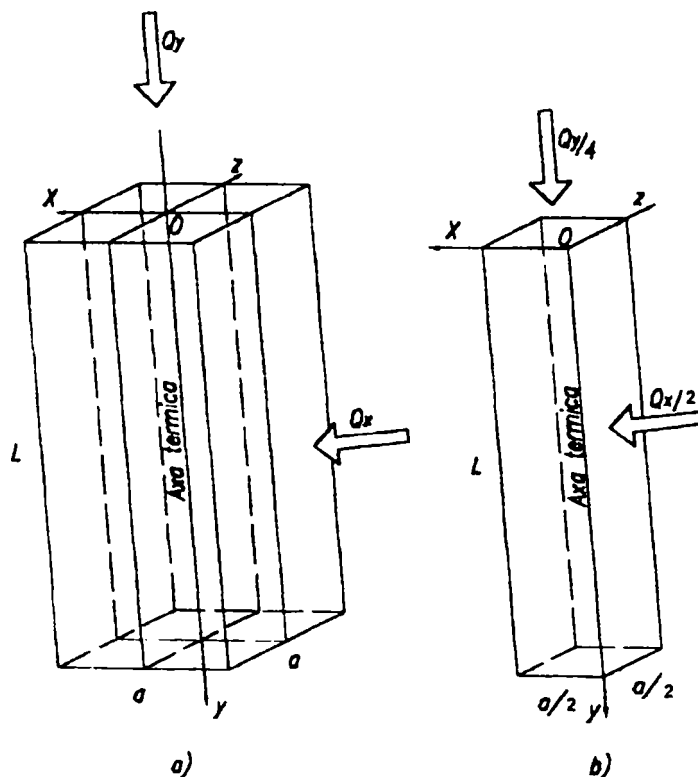


Fig.124 Modelarea proprietăților de simetrie:
a) piesa; b) element de volum rezultat în urma divizării.

Metoda directă de echivalare nodală

Discretizarea

Se presupune că transmisia căldurii are loc numai în planul x-y, adică nu există schimb de căldură pe direcția z. Piesa se divizează în elemente de forma unor triunghiuri dreptunghice, ca în figura 125.

Aproximarea

Se alege drept necunoscută temperatura T, astfel că funcția de interpolare este de forma:

$$\bar{T}(x, y) = N_i \cdot T_i + N_j \cdot T_j + N_k \cdot T_k$$

(131)

unde T_i, T_j, T_k sunt valorile nodale ale necunoscutei ;

N_i, N_j, N_k sunt funcțiile de formă care se calculează utilizând relațiile de mai jos:

$$\begin{aligned} N_i &= (a_i + b_i x + c_i y) / 2A \\ N_j &= (a_j + b_j x + c_j y) / 2A \\ N_k &= (a_k + b_k x + c_k y) / 2A \end{aligned} \quad (131)$$

$$\begin{aligned} a_i &= x_j y_k - x_k y_j & b_i &= y_j - y_k & c_i &= x_k - x_j \\ a_j &= x_k y_i - x_i y_k & b_j &= y_k - y_i & c_j &= x_i - x_k \\ a_k &= x_i y_j - x_j y_i & b_k &= y_i - y_j & c_k &= x_j - x_i \end{aligned} \quad (132)$$

$$A = \frac{a_i + a_j + a_k}{2} \quad (133)$$

Echivalarea nodală

Echivalarea nodală se face conform relației:

$$\{Q^{(e)}\} = [K^{(e)}] \cdot \{T^{(e)}\} \quad (134)$$

unde:

$$\{Q^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \\ Q_k \end{Bmatrix} \quad \{T^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} \quad (135)$$

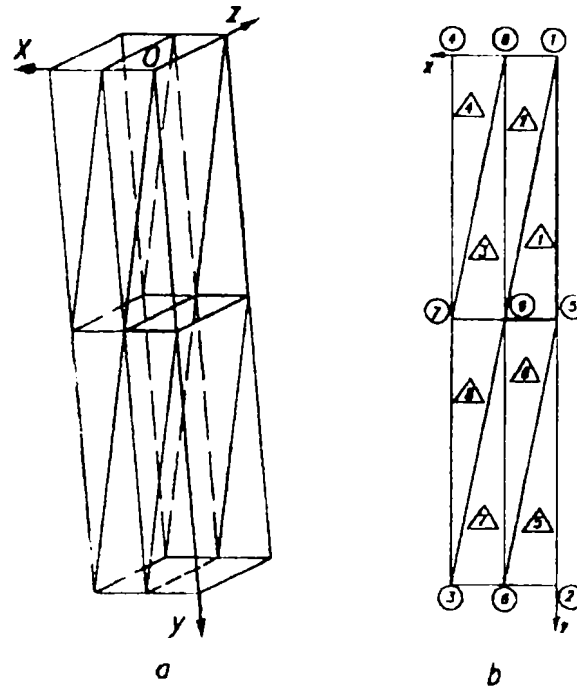


Fig.125 Discretizarea piesei; a) spațială; b) plană.

reprezintă vectorul fluxurilor de căldură nodale echivalente respectiv al temperaturilor nodale, matricea $[K^{(e)}]$ este matricea caracteristică, care pentru un element finit triunghiular se calculează după relația:

$$[K^{(e)}] = \frac{\lambda_x t}{4A} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{\lambda_y t}{4A} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k^2 \end{bmatrix} \quad (136)$$

În tabelul 18 sunt prezentate sintetic rezultatele calculelor pentru coeficienții care intră în componența matricilor caracteristice pentru fiecare element în parte.

Aria suprafeței elementului finit triunghiular considerat se calculează cu relația (133) și are valoarea de $A=0.000492 \text{ m}^2$, considerăm că și coeficientul de conductivitate termică λ are aceeași valoare $\lambda_x = \lambda_y = \lambda = 3.787 [W / m \cdot \text{grad}]$ la temperatura de 1525°C rezultă următoarele echivalări nodale scrise matricial conform relației (134) pentru fiecare element în parte începând de la 1 la 8:

$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_9 \\ Q_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.03795571 & 0 & -0.03795571 \\ 0 & 0.97831404 & -0.97831404 \\ -0.03795571 & -0.97831404 & 1.01626975 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_9 \\ T_5 \end{Bmatrix} \quad (137)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_8 \\ Q_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97831404 & -0.97831404 & 0 \\ -0.97831404 & 1.01626975 & -0.03795571 \\ 0 & -0.03795571 & 0.03795571 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_8 \\ T_9 \end{Bmatrix} \quad (138)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_8 \\ Q_7 \\ Q_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.03795571 & 0 & -0.03795571 \\ 0 & 0.97831404 & -0.97831404 \\ -0.03795571 & -0.97831404 & 1.01626975 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_8 \\ T_7 \\ T_9 \end{Bmatrix} \quad (139)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_8 \\ Q_4 \\ Q_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97831404 & -0.97831404 & 0 \\ -0.97831404 & 1.01626975 & -0.03795571 \\ 0 & -0.03795571 & 0.03795571 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_8 \\ T_4 \\ T_7 \end{Bmatrix} \quad (140)$$

Tab 18

N r.	Nodurile i j k	x_i [m]	x_j [m]	x_k [m]	y_i [m]	y_j [m]	y_k [m]	a_i [m ²]	a_j [m ²]	a_k [m ²]	b_i [m]	b_j [m]	b_k [m]	c_i [m]	c_j [m]	c_k [m]
1	1 9 5	0	0.013	0	0	0.066	0.066	0.000858	0	0	0	0.066	-0.066	-0.013	0	0.013
2	1 8 9	0	0.013	0.013	0	0	0.066	0.000858	0	0	-0.066	0.066	0	0	-0.013	0.013
3	8 7 9	0.013	0.026	0.013	0	0.066	0.066	0.000858	-0.000858	0.000858	0	0.066	-0.066	-0.013	0	0.013
4	8 4 7	0.013	0.026	0.026	0	0	0.066	0.001716	-0.000858	0	-0.066	0.066	0	0	-0.013	0.013
5	5 6 2	0	0.013	0	0.066	0.132	0.132	0.001716	0	-0.000858	0	0.066	-0.066	-0.013	0	0.013
6	5 5 6	0	0.013	0.013	0.066	0.066	0.132	0.000858	0.000858	-0.000858	-0.066	0.066	0	0	-0.013	0.013
7	9 3 6	0.013	0.026	0.013	0.066	0.132	0.132	0.001716	-0.000858	0	0	0.066	-0.066	-0.013	0	0.013
8	9 7 3	0.013	0.026	0.026	0.066	0.066	0.132	0.001716	0	-0.000858	-0.066	0.066	0	0	-0.013	0.013

$$\begin{Bmatrix} Q_5 \\ Q_6 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.03795571 & 0 & -0.03795571 \\ 0 & 0.97831404 & -0.97831404 \\ -0.03795571 & -0.97831404 & 1.01626975 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_5 \\ T_6 \\ T_2 \end{Bmatrix} \quad (141)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_5 \\ Q_9 \\ Q_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97831404 & -0.97831404 & 0 \\ -0.97831404 & 101626975 & -0.03795571 \\ 0 & -0.03795571 & 0.03795571 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_5 \\ T_9 \\ T_6 \end{Bmatrix} \quad (142)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_9 \\ Q_3 \\ Q_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.03795571 & 0 & -0.03795571 \\ 0 & 0.97831404 & -0.97831404 \\ -0.03795571 & -0.97831404 & 1.01626975 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_9 \\ T_3 \\ T_6 \end{Bmatrix} \quad (143)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_9 \\ Q_7 \\ Q_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97831404 & -0.97831404 & 0 \\ -0.97831404 & 101626975 & -0.03795571 \\ 0 & -0.03795571 & 0.03795571 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_9 \\ T_7 \\ T_3 \end{Bmatrix} \quad (144)$$

Matricea caracteristică globală este o matrice de dimensiune 9x9 constituită pe baza relațiilor (5.111 – 5.118) prezentată în relația de mai jos unde se poate observa aportul fiecărui element la constituirea acestei matrici:

$$[K] = \begin{bmatrix} 0.03795571 & 0 & 0 & 0 & 0.037955 & 0 & 0 & 0.978313 & 0 \\ 0.97831404 & 0 & 0 & 0 & 0.037955 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.016269 & 0 & 0 & 0.037955 & 0.978313 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.97831404 & 0 & 0 & 0.978313 & 0.037955 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03795571 & 1.016269 & 0 & 0 & 0.037955 & 0.978313 & 0 \\ 0.037955 & 0.037955 & 0 & 0 & 1.01626975 & 0 & 0 & 0 & 0.97831404 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.03795571 & 0 & 0 & 0 & 0.97831404 \\ 0 & 0.978313 & 0.978313 & 0 & 0.97831404 & 0.97831404 & 0 & 0 & 0.03795571 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.01626975 & 0 & 0 & 0.03795571 \\ 0 & 0 & 0.037955 & 0.037955 & 0 & 0 & 0.97831404 & 0 & 0.97831404 \\ 0.978313 & 0 & 0 & 0.978313 & 0 & 0 & 1.01626975 & 0.03795571 & 0.03795571 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.978313 & 0.03795571 & 0.978313 & 0.03795571 & 0.03795571 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.978313 & 0.03795571 & 0.978313 & 0.03795571 & 1.01626975 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.978313 & 0.03795571 & 0.978313 & 0.03795571 & 0.978313 \end{bmatrix}$$

(145)

Matricea caracteristică (145) după efectuarea calculelor devine:

$$[K] = \begin{bmatrix} 1.016269 & 0 & 0 & 0 & -0.037955 & 0 & 0 & -0.978313 & 0 \\ 0 & 1.016269 & 0 & 0 & 0.037955 & -0.978313 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.016269 & 0 & 0 & 0.978313 & -0.037955 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.016269 & 0 & 0 & -0.037955 & -0.978313 & 0 \\ -0.037955 & -0.037955 & 0 & 0 & 2.032538 & 0 & 0 & 0 & -1.956627 \\ 0 & -0.978313 & -0.978313 & 0 & 0 & 2.032538 & 0 & 0 & -0.075911 \\ 0 & 0 & -0.037955 & -0.037955 & 0 & 0 & 2.032538 & 0 & -1.956627 \\ -0.978313 & 0 & 0 & -0.978313 & 0 & 0 & 0 & 2.032538 & -0.075911 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.956627 & -0.075911 & -1.956627 & -0.075911 & 4.088465 \end{bmatrix} \quad (146)$$

Echivalarea nodală respectând relația (134) devine:

$$\begin{matrix} 2 \cdot Q_1 \\ Q_2 \\ 2 \cdot Q_3 \\ Q_4 \\ 3 \cdot Q_5 \\ 3 \cdot Q_6 \\ 3 \cdot Q_7 \\ 3 \cdot Q_8 \\ 16 \cdot Q_9 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1.016269 & 0 & 0 & 0 & -0.037955 & 0 & 0 & -0.978313 & 0 \\ 0 & 1.016269 & 0 & 0 & 0.037955 & -0.978313 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.016269 & 0 & 0 & 0.978313 & 0.037955 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.016269 & 0 & 0 & 0.037955 & 0.978313 & 0 \\ -0.037955 & -0.037955 & 0 & 0 & 2.032538 & 0 & 0 & 0 & 1.956627 \\ 0 & -0.978313 & -0.978313 & 0 & 0 & 2.032538 & 0 & 0 & -0.075911 \\ 0 & 0 & -0.037955 & -0.037955 & 0 & 0 & 2.032538 & 0 & -1.956627 \\ -0.978313 & 0 & 0 & -0.978313 & 0 & 0 & 0 & 2.032538 & -0.075911 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.956627 & -0.075911 & -1.956627 & -0.075911 & 4.088465 \end{bmatrix} \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \\ T_9 \end{matrix} \quad (147)$$

Căldura care se degajă în lungul axelor x și y se calculează cu formula:

$$Q = \frac{\lambda}{l} \cdot A(T_A - T_B) \quad [W] \quad (148)$$

unde: λ - coeficientul de conductivitate termică [W/m.grad];

l – grosimea stratului de metal prin care are loc transferul [m];

A – aria suprafeței [m²];

T_A, T_B – temperaturile între care are loc transferul.

Căldura degajată în lungul axei x este:

$$Q_x = \frac{3.787}{0.026} \cdot 0.132 \cdot 0.026 \cdot (1525 - 40.214) = 742.212 [W]; \quad (149)$$

Căldura degajată în lungul axei y este:

$$Q_y = \frac{3.787}{0.132} \cdot 0.026 \cdot 0.026 \cdot (1525 - 40.214) = 28.795 [W]; \quad (150)$$

Condițiile inițiale sunt următoarele:

- în lungul axei termice respectiv nodurile 1,8 și 5 temperatura are valoarea maximă de 1525 °C;

- pe suprafața de contact
 metal formă dată de nodurile 4,7,3
 temperatura se consideră constantă și
 egală cu 40.214 °C;

- căldura degajată de
 metal în timpul răcirii se distribuie
 uniform pe laturile elementelor finite
 (triunghiuri), iar căldura de pe o latură
 se împarte în jumătate și se aplică în
 nodurile corespunzătoare laturii ca în
 figura (126).

Din egalitatea (147) ținând cont de
 condițiile inițiale și de faptul că fluxul de
 căldură care iese din corp este
 considerat negativ rezultă următorul
 sistem de ecuații:

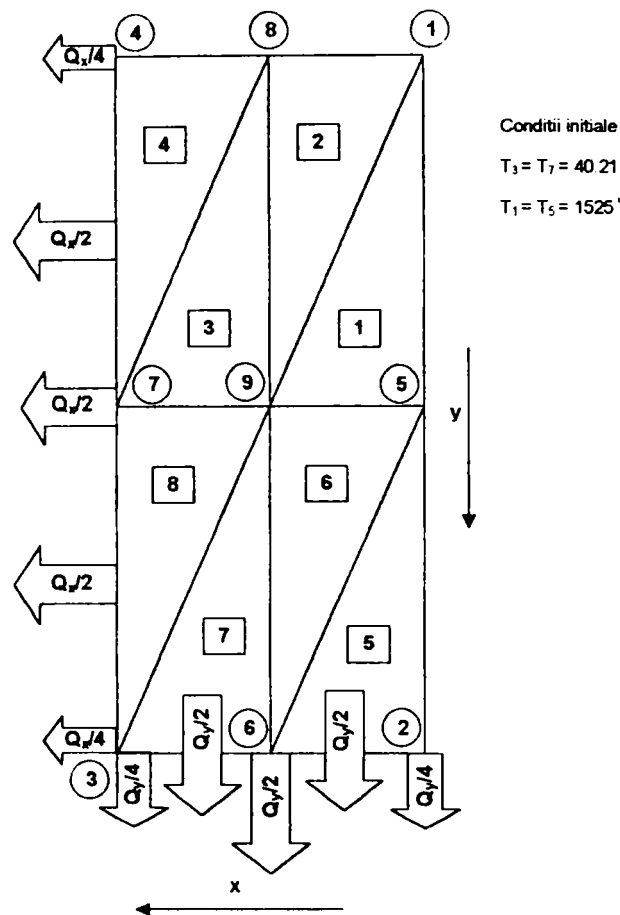


Fig.126 Distribuția temperaturii în piesa turnată;
 condiții inițiale

$$\begin{cases} -2 \cdot Q_3 = 1.016269 \cdot T_3 - 0.978313 \cdot T_6 - 0.037955 \cdot T_7 \\ -3 \cdot Q_7 = -0.037955 \cdot T_3 - 0.037955 \cdot T_4 - 2.032538 \cdot T_7 \\ -Q_2 = 1.016269 \cdot T_2 - 0.037955 \cdot T_5 - 0.978313 \cdot T_6 \end{cases} \quad (151)$$

care după înlocuirea valorilor cunoscute ale temperaturilor devine:

$$\begin{cases} -2 \cdot (385.5035) = 1.016269 \cdot 40.214 - 0.978313 \cdot T_6 - 0.037955 \cdot 40.214 \\ -3 \cdot (742.212) = -0.037955 \cdot 40.214 - 0.037955 \cdot 1443 + 2.032538 \cdot 40.214 - 1.956627 \cdot T_6 \\ -14.3975 = 1.016269 \cdot T_2 - 0.037955 \cdot 1525 - 0.978313 \cdot 828.312 \end{cases} \quad (152)$$

de unde rezultă următoarele valori ale necunoscutelor nodale:

$$\begin{cases} T_6 = 828.312^\circ C \\ T_9 = 1150.999^\circ C \\ T_2 = 840.163^\circ C \end{cases} \quad (153)$$

Cunoscând valorile nodale ale necunoscutei (temperatura) se determină în continuare funcția de interpolare dată de relația (131) pentru fiecare element finit considerat. Pentru calculul funcțiilor de formă se folosesc relațiile (131) și valorile din tabelul 18.

- pentru elementul 1 avem:

$$T_{(x,y)}^{(1)} = N_1 \cdot T_1 + N_9 \cdot T_9 + N_5 \cdot T_5 \quad (154)$$

unde:

$$\begin{cases} N_1 = (0.000858 + 0 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_9 = (0 + 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_5 = (0 - 0.066 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (155)$$

$$\begin{cases} N_1 = 1 - 15.15 \cdot y \\ N_9 = 76.92 \cdot x \\ N_5 = -76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y \end{cases} \quad (156)$$

prin înlocuirea relațiilor (156) și valorile pentru temperaturi, relația 154 devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^1 = (1 - 15.15 \cdot y) \cdot 1525 + 76.92 \cdot x \cdot 1150.99 + (-76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y) \cdot 1525 \quad (157)$$

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(1)} = 1525 - 28768.157 \cdot x \quad (158)$$

- pentru elementul 2 avem:

$$T_{(x,y)}^{(2)} = N_1 \cdot T_1 + N_8 \cdot T_8 + N_9 \cdot T_9 \quad (159)$$

unde:

$$\begin{cases} N_1 = (0.000858 - 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_8 = (0 + 0.066 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_9 = (0 + 0 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (160)$$

$$\begin{cases} N_1 = 1 - 76.923 \cdot x \\ N_8 = 76.923 \cdot x - 15.151 \cdot y \\ N_9 = 15.151 \cdot y \end{cases} \quad (161)$$

prin înlocuirea relațiilor (161) și valorile pentru temperaturi, relația (159) devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^2 = (1 - 76.923 \cdot x) \cdot 1525 + (76.923 \cdot x - 15.151 \cdot y) \cdot 1525 + 15.151 \cdot y \cdot 1150.999$$

(162)

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(2)} = 1525 - 5666.1152 \cdot y \quad (163)$$

- pentru elementul 3 avem:

$$T_{(x,y)}^{(3)} = N_8 \cdot T_8 + N_7 \cdot T_7 + N_9 \cdot T_9 \quad (164)$$

unde:

$$\begin{cases} N_8 = (0.000858 + 0 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_7 = (-0.000858 + 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_9 = (0.000858 - 0.066 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (165)$$

$$\begin{cases} N_8 = 1 - 15.15 \cdot y \\ N_7 = -1 + 76.92 \cdot x \\ N_9 = 1 - 76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y \end{cases} \quad (166)$$

prin înlocuirea relațiilor (166) și valorile pentru temperaturi, relația (164) devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(3)} = (1 - 15.15 \cdot y) \cdot 1525 + (-1 + 76.92 \cdot x) \cdot 40.214 + (1 - 76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y) \cdot 1150.999 \quad (167)$$

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(3)} = 2635.785 - 5666.1152 \cdot y - 85441.582 \cdot x \quad (168)$$

- pentru elementul 4 avem:

$$T_{(x,y)}^{(4)} = N_8 \cdot T_8 + N_4 \cdot T_4 + N_7 \cdot T_7 \quad (169)$$

unde:

$$\begin{cases} N_8 = (0.001716 - 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_4 = (-0.000858 + 0.066 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_7 = (0 + 0 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (170)$$

$$\begin{cases} N_8 = 2 - 76.92 \cdot y \\ N_4 = -1 + 76.92 \cdot x - 15.15 \cdot y \\ N_7 = 15.15 \cdot y \end{cases} \quad (171)$$

prin înlocuirea relațiilor (171) și valorile pentru temperaturi, relația 169 devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(4)} = (2 - 76.92 \cdot y) \cdot 1525 + (-1 + 76.92 \cdot x - 15.15 \cdot y) \cdot 1443 + 15.15 \cdot y \cdot 40.214 \quad (172)$$

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(4)} = 1607 - 6307.44 \cdot x - 21252.208 \cdot y \quad (173)$$

- pentru elementul 5 avem:

$$T_{(x,y)}^{(5)} = N_5 \cdot T_5 + N_6 \cdot T_6 + N_2 \cdot T_2 \quad (174)$$

unde:

$$\begin{cases} N_5 = (0.001716 + 0 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_6 = (0 + 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_2 = (-0.000858 - 0.066 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (175)$$

$$\begin{cases} N_5 = 2 - 15.15 \cdot y \\ N_6 = 76.92 \cdot x \\ N_7 = -1 - 76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y \end{cases} \quad (176)$$

prin înlocuirea relațiilor (176) și valorile pentru temperaturi, relația (174) devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^5 = (2 - 15.15 \cdot y) \cdot 1525 + 76.92 \cdot x \cdot 828.312 + (-1 - 76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y) \cdot 840.163 \quad (177)$$

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(5)} = 2209.837 - 10375.281 \cdot y - 911.578 \cdot x \quad (178)$$

- pentru elementul 6 avem:

$$T_{(x,y)}^{(6)} = N_5 \cdot T_5 + N_9 \cdot T_9 + N_6 \cdot T_6 \quad (179)$$

unde:

$$\begin{cases} N_5 = (0.000858 - 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_9 = (0.000858 + 0.066 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_6 = (-0.000858 + 0 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (180)$$

$$\begin{cases} N_5 = 1 - 76.92 \cdot x \\ N_9 = (1 + 76.92 \cdot x - 15.15 \cdot y) \\ N_6 = (-1 + 15.15 \cdot y) \end{cases} \quad (181)$$

prin înlocuirea relațiilor (181) și valorile pentru temperaturi, relația (179) devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^6 = (1 - 76.92 \cdot x) \cdot 1525 + (1 + 76.92 \cdot x - 15.15 \cdot y) \cdot 1150.999 + (-1 + 15.15 \cdot y) \cdot 828.312 \quad (182)$$

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(6)} = 1847.687 - 28768.157 \cdot x - 4888.7081 \cdot y \quad (183)$$

- pentru elementul 7 avem:

$$T_{(x,y)}^{(7)} = N_9 \cdot T_9 + N_3 \cdot T_3 + N_6 \cdot T_6 \quad (184)$$

unde:

$$\begin{cases} N_9 = (0.001716 + 0 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_3 = (-0.000858 + 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_6 = (0 - 0.066 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (185)$$

$$\begin{cases} N_9 = 2 - 15.15 \cdot y \\ N_3 = -1 + 76.92 \cdot x \\ N_6 = -76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y \end{cases} \quad (186)$$

prin înlocuirea relațiilor (186) și valorile pentru temperaturi, relația (184) devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^7 = (2 - 15.15 \cdot y) \cdot 1150.999 + (-1 + 76.92 \cdot x) \cdot 40.214 + (-76.92 \cdot x + 15.15 \cdot y) \cdot 828.312 \quad (187)$$

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(7)} = 2261.784 - 4888.5717 \cdot y - 60620.498 \cdot x \quad (188)$$

- pentru elementul 8 avem:

$$T_{(x,y)}^{(8)} = N_9 \cdot T_9 + N_7 \cdot T_7 + N_3 \cdot T_3 \quad (189)$$

unde:

$$\begin{cases} N_9 = (0.001716 - 0.066 \cdot x + 0 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_7 = (0 + 0.066 \cdot x - 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \\ N_3 = (-0.000858 + 0 \cdot x + 0.013 \cdot y) / 2 \cdot 0.000492 \end{cases} \quad (190)$$

$$\begin{cases} N_9 = 2 - 76.92 \cdot x \\ N_7 = 76.92 \cdot x - 15.15 \cdot y \\ N_3 = (-1 + 15.15 \cdot y) \end{cases} \quad (191)$$

prin înlocuirea relațiilor (191) și valorile pentru temperaturi, relația (189) devine:

$$\tilde{T}_{(x,y)}^8 = (2 - 76.92 \cdot x) \cdot 1150.999 + (76.92 \cdot x - 15.15 \cdot y) \cdot 40.214 + (-1 + 15.15 \cdot y) \cdot 40.214 \quad (192)$$

$$\tilde{T}_{(x,y)}^{(8)} = 2261.784 - 85441.582 \cdot x \quad (193)$$

În tabelul 19 sunt prezentate sintetic valorile nodale ale temperaturilor și funcțiile de formă pentru fiecare element finit rezultat în urma discretizării

Tab 19

Nr. elem.	Nodurile			T _i [°C]	T _j [°C]	T _k [°C]	N _i	N _j	N _k	T _(x,y)
	I	J	K							
1	1	9	5	1525	1150.99 ₉	1525	1-15.15y	76.92x	-76.92x+15.15y	1525-28768.157x
2	1	8	9	1525	1525	1150.999	1-76.923x	76.923x-15.151y	15.15y	1525-5666.1152y
3	8	7	9	1525	40.114	1150.999	1-15.15y	-1+76.92x	1-76.92x+15.15y	2635.785-5666.152y-85441.582x
4	8	4	7	1525	1443	40.214	2-76.92x	-1+76.92x-15.15y	15.15y	16.7-6307.44x-21252.208y
5	5	6	2	1525	828.312	840.163	2-15.15y	76.92x	-1-76.92x+15.15y	2209.837-10375.281y-911.578x
6	5	9	6	1525	1150.99 ₉	828.312	1-76.92x	1+76.92x-15.15y	-1+15.15y	1847.687-28768.157x-4888.7081y
7	9	3	6	1150.99 ₉	40.214	828.312	2-15.15y	-1+76.92x	-76.92x+15.15y	2261.784-4888.8717y-60620.498x
8	9	7	3	1150.99 ₉	40.214	40.214	2-76.92x	76.92x-15.15y	-1+15.15y	2261.784-85441.582x

Calculul valorii temperaturii pe baza funcțiilor de formă determinate anterior pentru diverse puncte ale căror coordonate x și y sunt cunoscute sunt prezentate în tabelul 20 și figura 127.

Tab. 20

Nr. elem	Punct considerat	X [m]	Y [m]	T [°C]
1	A1	0.00228	0.02418	1459.408
	B1	0.00498	0.05535	1381.734
	C1	0.01036	0.06393	1226.961
2	A2	0.00856	0.00637	1488.906
	B2	0.01171	0.05241	1228.038
	C2	0.0108	0.03689	1315.977
3	A3	0.01509	0.02558	1201.531
	B3	0.01802	0.04859	820.809
	C3	0.0226	0.06332	346.024
4	A4	0.02075	0.00852	1295.051
	B4	0.02251	0.02968	834.253
	C4	0.02436	0.04255	549.069
5	A5	0.00103	0.08228	1355.219
	B5	0.00385	0.12169	943.759
	C5	0.01006	0.12953	856.756
6	A6	0.00838	0.07255	1251.934
	B6	0.00666	0.0909	1211.707
	C6	0.01134	0.1122	972.943
7	A7	0.01444	0.08271	982.090
	B7	0.01634	0.11652	701.628
	C7	0.02153	0.12704	335.580
8	A8	0.01644	0.06985	857.124
	B8	0.02083	0.09181	482.035
	C8	0.02412	0.11311	200.933

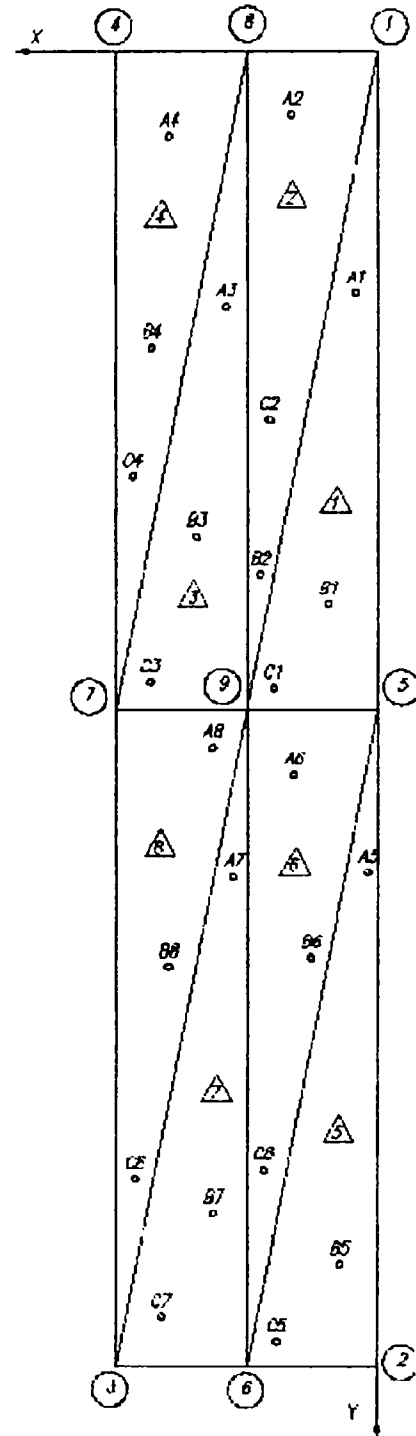


Fig.127 Temperatura in diverse puncte ale piesei turnate

În figura 128 este prezentată distribuția temperaturii în piesa turnată utilizând programul ANSYS 5.4.

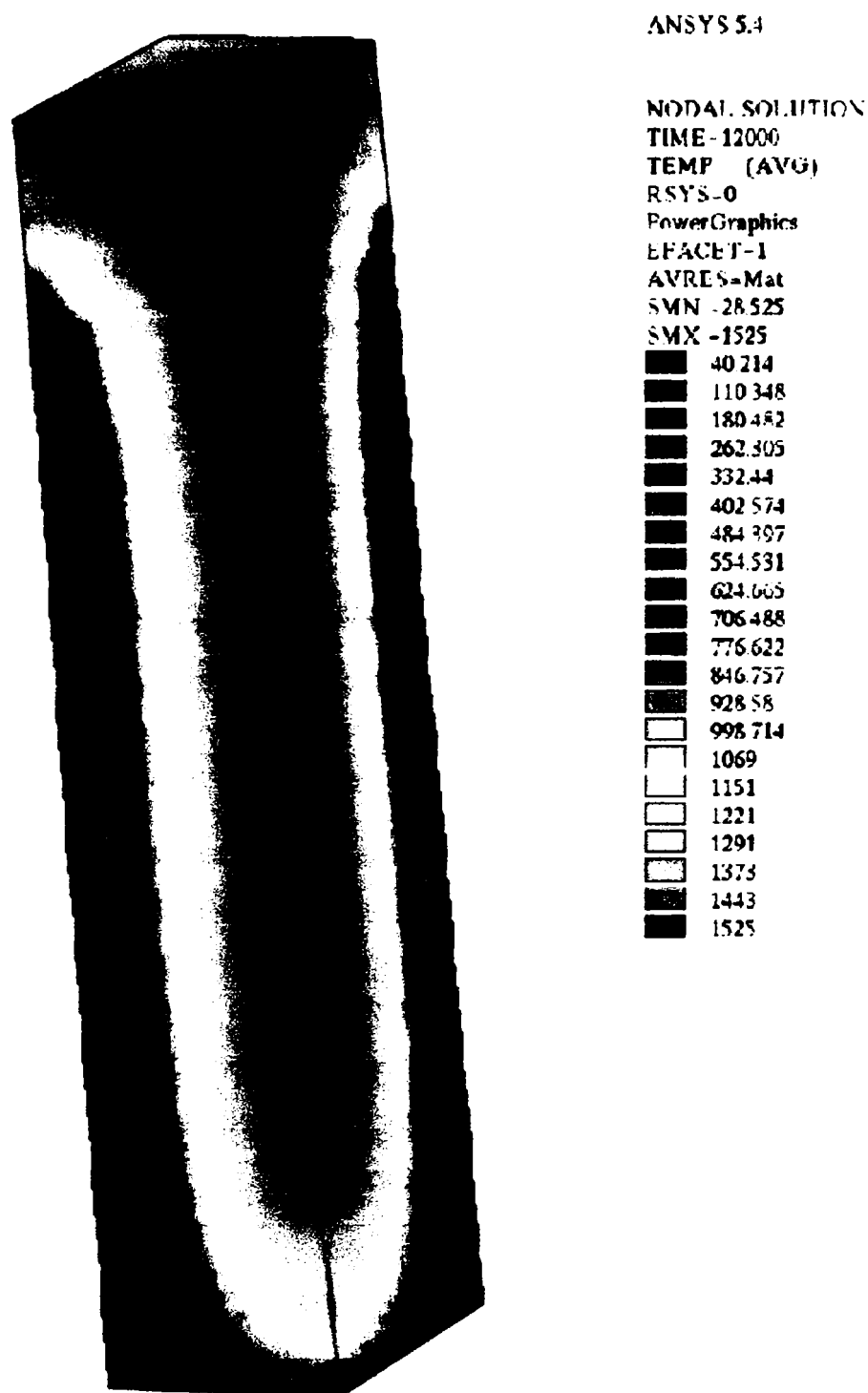


Fig.128 Distribuția temperaturii în piesa turnată

4.13 Optimizarea proiectării pieselor turnate sub presiune utilizând analiza CAE

Un sistem CAE de performanță, dedicat simulării turnării sub presiune a pieselor din aliaje neferoase trebuie să confere o înaltă predicție a analizelor ce trebuie realizate în toate stadiile de proiectare, fabricare și asigurării calității produsului.

Dintre analizele curente disponibile într-un sistem CAE, se pot enumera evaluarea grosimii pereților reperului, dimensionarea reperului, amplasarea punctelor de alimentare a cavității matriței, amplasarea circuitului de răcire, optimizarea condițiilor de proces, evaluarea formei geometrice a reperului turnat.

Cea mai completă analiză CAE posibil de realizat într-un sistem complex, dedicat tehnologiei pieselor turnate sub presiune trebuie să ofere răspuns la toate problemele tehnologice, incluzând cele mai mici detalii.

Aceste analize se realizează înainte de finalizarea proiectării piesei turnate, precum și a matriței.

4.13.1 Funcțiile unui sistem CAE utilizat la analiza pieselor turnate sub presiune.

4.13.1.1 Funcția de estimare a procesului

Trebuie să evalueze cu precizie gradul de fezabilitate a piesei turnate în funcție de precizia ei geometrică. Ea trebuie să ofere inginerului proiectant condițiile de intrare în procesele de simulare. Funcția de estimare a procesului trebuie să ghideze inginerul proiectant prin toate deciziile ce se iau în această etapă:

- Alegerea aliajului;
- Alegerea agentului termic de răcire;
- Selectarea materialului pentru matriță;
- Alegerea mașinii de turnat sub presiune, în funcție de caracteristicile modelului.

Estimarea procesului are ca date de intrare valori introduse de către inginerul proiectant și îi oferă acestuia următoarele răspunsuri:

- Caracteristica materialului;

- Simularea umplerii matriței, la care se adaugă și simulări privind contracția și deformația reperului;
- Materialul matriței împreună cu conductivitatea termică respectivă;
- Tipul mașini de turnat;
- Determinarea drumului maxim de curgere, pentru un anumit aliaj topit, la o anumită temperatură;
- Optimizarea grosimii pereților piesei;
- Determinarea combinației optime figura 129 pentru a minimiza problemele care apar în atelier

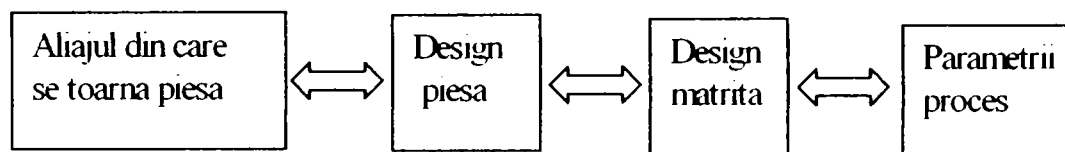


Fig.129 Ecuația de optimizare a tehnologiei de obținere a pieselor turnate sub presiune

- Stabilirea corectă a parametrilor de proces, cum ar fi: temperatura topiturii, temperatura matriței, timpul de umplere, presiunea de turnare, forța de închidere a matriței;
- Estimarea gradului de contracție al piesei;
- Modificarea geometriei piesei, precum și a variabilelor de proces astfel încât să se optimizeze durata ciclului de turnare.

4.13.1.2 Funcț... de modelare

Funcția de modelare a sistemului CAE trebuie să permită discretizarea nu numai a piesei, ci și a rețelei de alimentare, a sistemului de răcire pentru a putea fi utilizate în toate simulările figura 130.

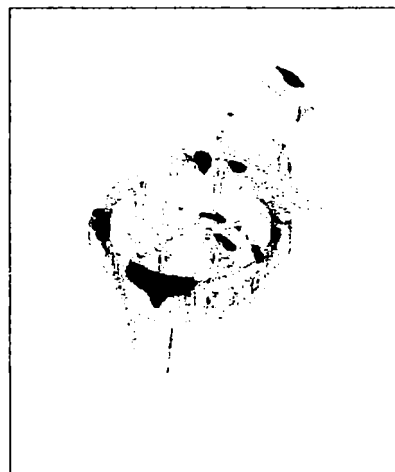


Fig.130 Funcția de modelare- discretizarea piesei și a canalelor de alimentare

4.13.1.3 Funcția de vizualizare

Funcția de vizualizare îi oferă posibilitatea utilizatorului să "vadă fenomenele din interiorul matriței" în timpul procesului de turnare sub presiune.

Utilizatorul poate să examineze rezultatele pentru fiecare simulare, utilizând diferite forme grafice. Capabilitățile funcției de vizualizare a sistemului CAE încep de la rapoarte tip text și până la contururi colorate. În figura 131 este prezentată umplerea matriței cu punerea în evidență a zonei de turbulență.

4.13.1.4 Funcția de simulare a umplerii matriței.

Funcția de simulare a curgerii aliajului topit prin matriță oferă cel mai eficient mod de a simula comportamentul său (fluid) în procesul de turnare. Proiectantul "vede" direcția curgând prin canalele de distribuție, și cavitatea matriței. Astfel el poate să optimizeze grosimea pereților piesei și să determine cu precizie poziția locului de alimentare cu aliaj, presiunea de injectare și forța de închidere.

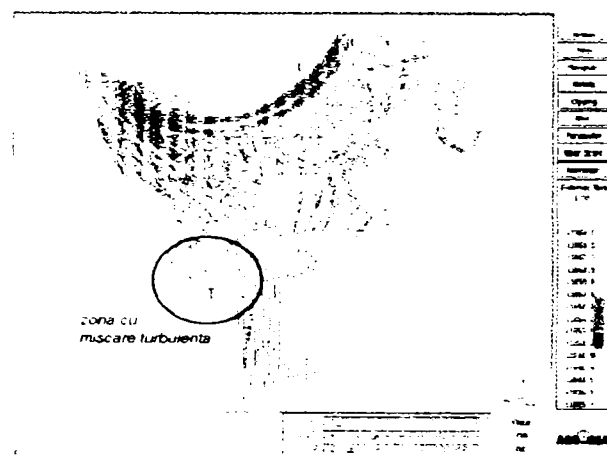


Fig. 131 Funcția de vizualizare. Punerea în evidență a zonei de turbulență

Figura 132 prezintă frontul topiturii în diverse momente ale curgerii.

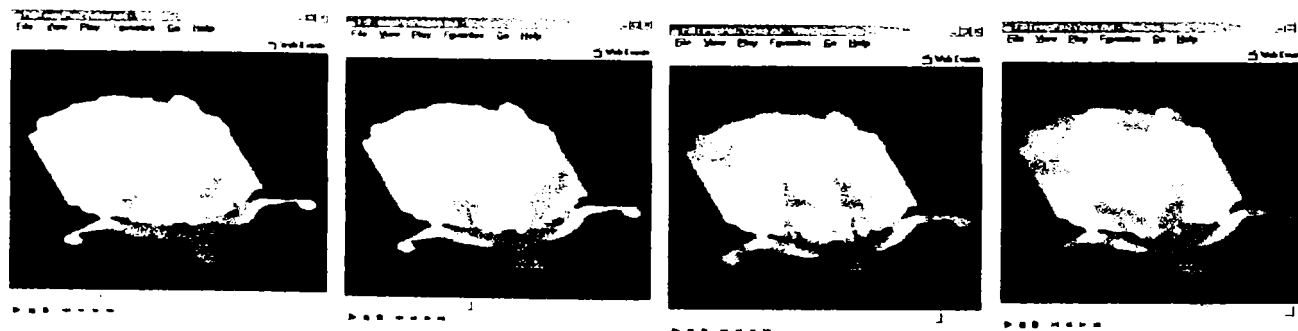


Fig.132 Vizualizarea curgerii aliajului topit în matriță.

Figura 133 prezintă diagrama " forță de închidere – timp " în timpul umplerii matriței utilă tehnologului pentru a selecta dimensiunea optimă a mașinii de turnat sub presiune pentru reperul respectiv.

4.13.1.5 Funcția de simulare a proceselor post – umplere

Această funcție simulează starea de începere a solidificării aliajului în interiorul matriței figura 134, distribuția temperaturii în cavitatea amprentă figura. 135 a și în piesă figura 135 b.

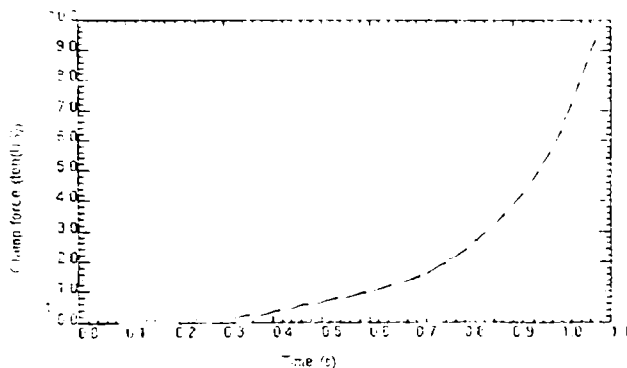


Fig.133 Diagrama " Forță de închidere – Timp"

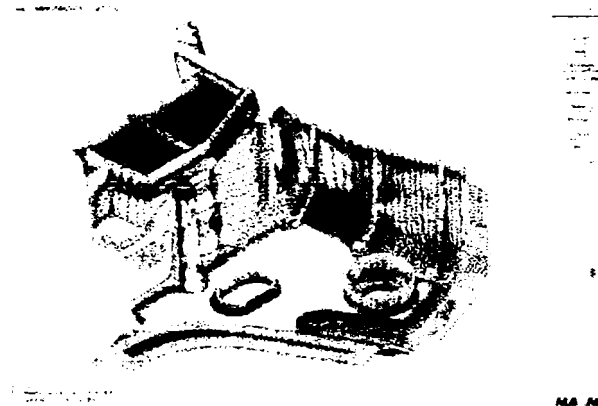
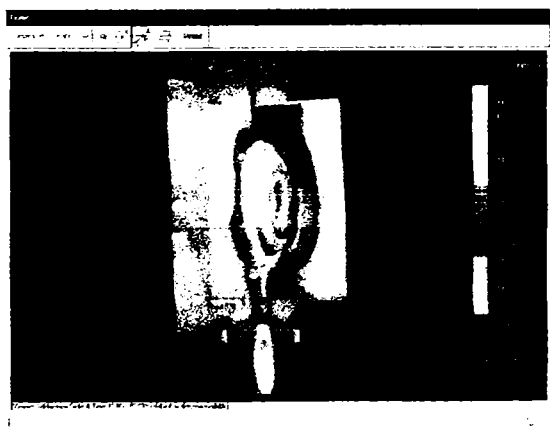
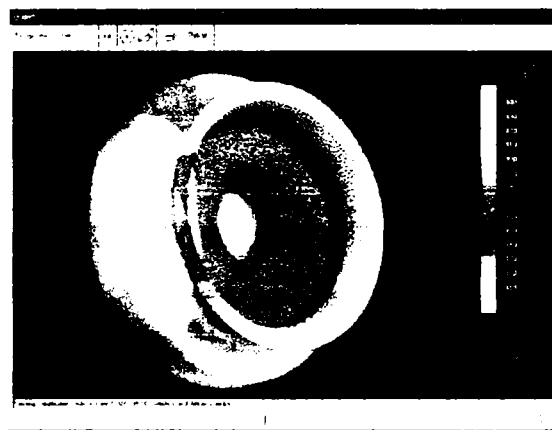


Fig.134 Funcția de simulare a solidificării aliajului în cavitatea amprentă



a)



b)

Fig.135 Distribuția temperaturii;
a- în cavitatea amprentă; b- în piesa turnată sub presiune

4.13.1.6 Funcția de simulare a răcirii

Răcirea matriței este variabilă cu cel mai mare impact în calitatea reperului turnat. Funcția de simulare a răcirii matriței analizează întregul ciclu și oferă informații critice necesare optimizării condițiilor procesului de răcire, proiectării matriței cât și proiectării piesei.

În majoritatea cazurilor, prin corectitudinea analizei, această funcție are un mare impact asupra duratei ciclului de turnare în sensul reducerii acestuia.

O importanță deosebită se acordă la cele mai avansate sisteme CAE pentru prezentarea explicită a condițiilor de răcire asimetrice dintre miezul matriței și pereții exteriori ai acesteia.

Această facilitate suplimentară este utilă în reducerea problemelor de deformări ale reperului prin modificarea proiectului și echilibrarea răcirii.

Figura 136 reprezintă calculul răcirii medii a pereților matriței în timpul unui ciclu de turnare sub presiune. Diferența de temperatură prezintă în gradient. Temperatura pereților matriței poate fi determinată cu precizie, pentru un anumit moment din ciclul

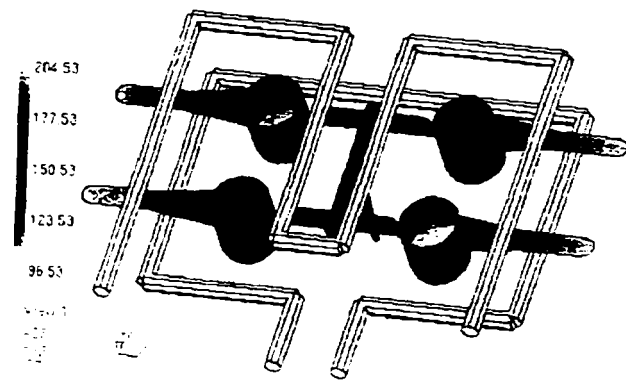


Fig.136 Funcția de simulare a răcirii

4.13.1.7 Funcția de determinare a tensiunilor remanente

Eliminarea tensiunilor remanente este o funcție esențială, care ajută la înțelegerea fenomenelor complexe și să minimizeze impactul acestora asupra calității reperului, prin modificări introduse în proiect asupra reperului și matriței.

La calcularea tensiunilor remanente dezvoltate în întregul ciclu de prelucrare, sistemul ține seama de efectele distribuției de temperatură și presiune,

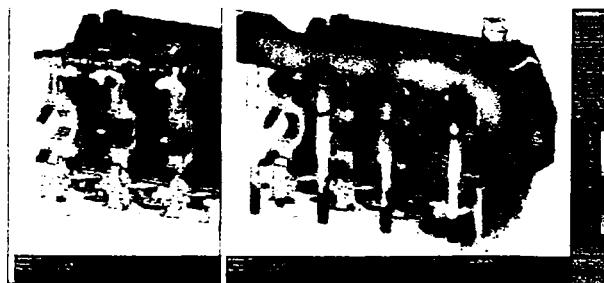


Fig. 137 Tensiuni remanente

proprietățile aliajului topit și forma geometrică a piesei.

Se determină astfel cu precizie distribuția stării de tensiuni în orice punct al piesei rezultate.

Figura 137 prezintă media tensiunilor remanente ale piesei tumate sub presiune (văzute din exteriorul piesei)

4.13.1.8 Funcția de determinare a contracțiilor și deformațiilor

Estimarea modului în care va arăta reperul tumat și cum se va comporta după extragerea din matriță este deosebit de important. Stabilitatea dimensională și precizia dimensională se pot atinge cu ușurință dacă se utilizează un sistem CAE în conjuncție cu sistemul CAD/CAM.

Figura 138 prezintă estimarea deplasărilor după defomare atât a piesei cât și a matriței.

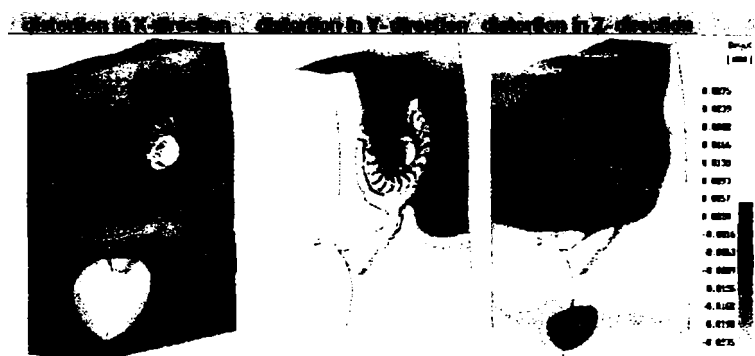


Fig. 138 Estimarea deplasărilor

Fabricatie flexibilă în turnarea sub presiune

5.1 Generalități

Constrângerile legate de produse privind prețul, calitatea și promptitudinea în livrare impun sistemelor de producție imperative de productivitate, fiabilitate și flexibilitate.

Conceptul de flexibilitate constă în necesitatea unei percepții globale asupra întreprinderii și asupra mediului său. Flexibilitatea în producție în condițiile păstrării unei productivități specifice producției de masă implică pe lângă structurile de producție și armonia funcțională a cel puțin trei factori: omul, organizarea și piața.

Capacitatea de a produce în condiții de productivitate și calitate piese diverse de manieră aleatoare este foarte diferită de la un sistem de fabricație la altul.

În general se acceptă că un atelier flexibil se compune din trei elemente principale:

- un sistem de fabricație (sau transport – stocare);
- un sistem de manipulare;
- un sistem de comandă și control.

Combinarea celor trei dau ca rezultat un schelet pe care se pot construi un număr nelimitat de soluții practice.

Celula reprezintă forma cea mai simplă de organizare a producției integrate, având minim o mașină echipată (CNC sau AP) pentru a putea fi integrată informatic cu componentele unui subsistem de manipulare și îndeplinind sarcini specifice unor operații de transformare (fabricație) transport – stocare sau control. Pentru o celulă suplețea de adaptare este prioritară și are în general scopul eliberării cel puțin parțiale a operatorului uman de mașină. Un nivel superior este dat de celula flexibilă robotizată care se poate integra într-un sistem de nivel superior. Costul lor este accesibil și pentru întreprinderile mici și mijlocii.

Atelierele flexibile reprezintă o formă complexă de organizare a producției pe baza mai multor celule flexibile reunite și integrate într-un sistem.

În figura 139 se prezintă schematizarea principiului global al producției integrate în cazul realizării produselor prin turnare sub presiune.

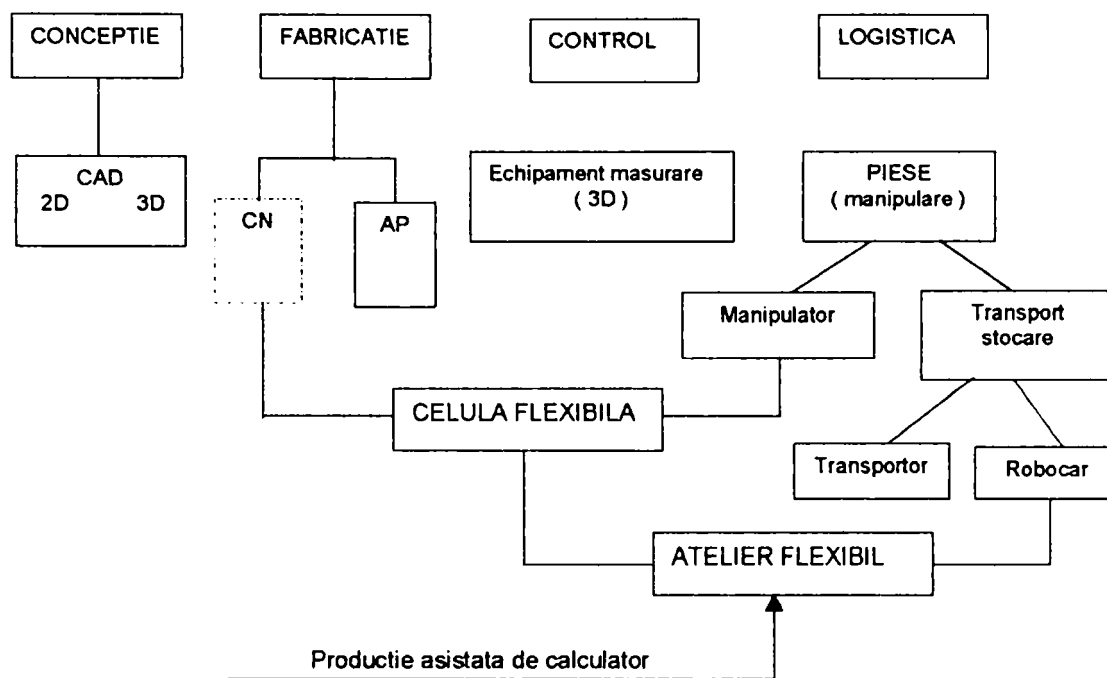


Fig. 139 Principiul global al producției integrate

În figura 140 se prezintă sistemul informatic utilizat pe mașinile de turnat sub presiune bazat pe cunoșterea parametrilor de reglaj ai mașinii a parametrilor procedurii și a celor legați de exploatarea și gestiunea comenzilor pentru optima utilizare a mașinii.

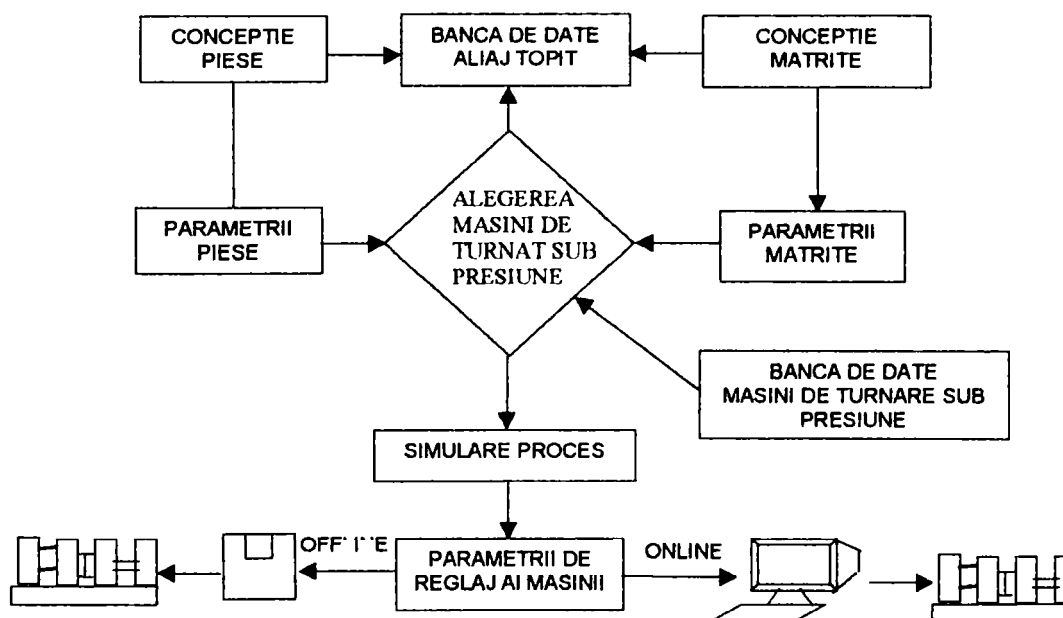


Fig. 140 Sistem informatic utilizat pe mașinile de turnat sub presiune.

În figura 141 se prezintă layout-ul unui atelier flexibil de turnare sub presiune.

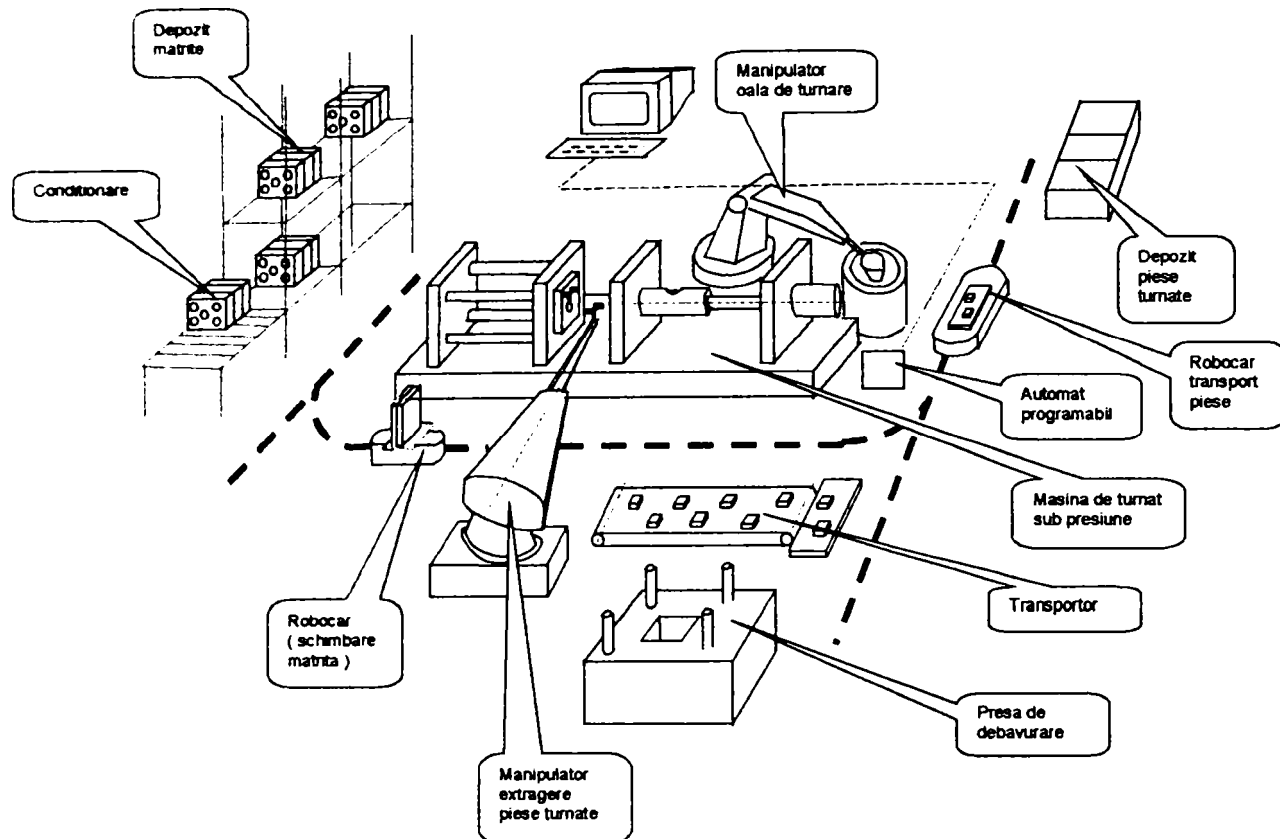
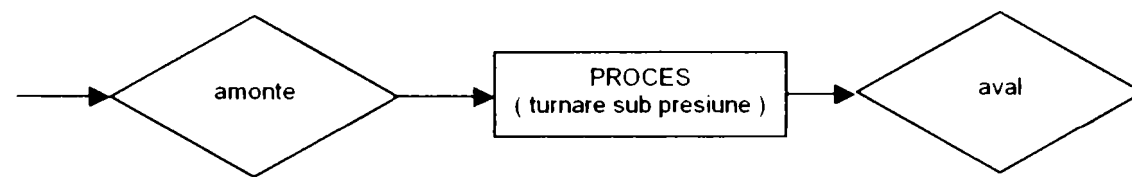


Fig. 141 Layout – atelier de turnare sub presiune

În cazul proceselor de turnare sub presiune problemele care trebuie rezolvate prin automatizare și robotizare țin atât de proces cât și de amonte și avalul lui figura 142.



FUNCTII	alimentare metal topit	<ul style="list-style-type: none"> ➤ umplere cavitate matrita ➤ schimbare matrita ➤ reglare parametrii 	finisare manipulare depozitare
MIJLOACE	manipulator	<ul style="list-style-type: none"> ➤ comanda miscarii pistonului masinii ca o axa de robot ➤ dispozitive schimbare matrite ➤ automate programabile 	manipulatoare roboti robocare

Fig. 142 Automatizarea procesului de turnare sub presiune.

În amonte problema alimentării cu aliaj topit este asigurată prin utilizarea unui manipulator care asigură alimentarea, cu o cantitate bine determinată de aliaj topit, camera de compresie a mașinii de turnat.

În cadrul procesului de turnare automate programabile supervizate de un calculator central asigură prin programe adecvate atât parametrii optimi ai ciclului (presiune, temperaturi, durată) cât și încărcarea optimă a mașinii prin intervențiile de schimbare a matriței.

Pentru o umplere optimă a cavității matriței tinând cont de curgerea metalului topit în funcție de caracteristicile geometrice ale canalelor de alimentare (rezistențe hidraulice) de tipul de curgere (laminară sau turbulentă) se impune determinarea unei legi de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune, comanda acestuia făcându-se la fel ca și comanda unei axe de robot.

Schimbarea matrițelor presupune un sistem logistic adecvat de manipulare și transport cât și adaptări constructive pe mașină și sculă care permit instalarea și racordarea rapidă a matriței (sistem de conditionare a matriței, platformă de montare –

demontare, forme standardizate, bride de fixare rapidă, elemente de clipsare rapidă, maipulatoare, robocare etc.)

Evacuarea pieselor turnate în cicluri scurte și deci cadențe ridicate va presupune utilizarea unui robot cu senzori ai stării de evacuare corectă, platforme și benzi de stocare a pieselor, sisteme de ungere matriță și în final operațiuni ale robocarului pentru stocarea pieselor în magazii.

Ralizarea matrițelor se face în celule sau ateliere flexibile de fabricație, utilizându-se tipizate

5.2 Sisteme de alimentare cu aliaj topit.

La sistemele automate flexibile există soluții constructive de a asigura alimentarea automată a mașinii de turnat sub presiune utilizând manipulatoare și roboți industriali figura 143.

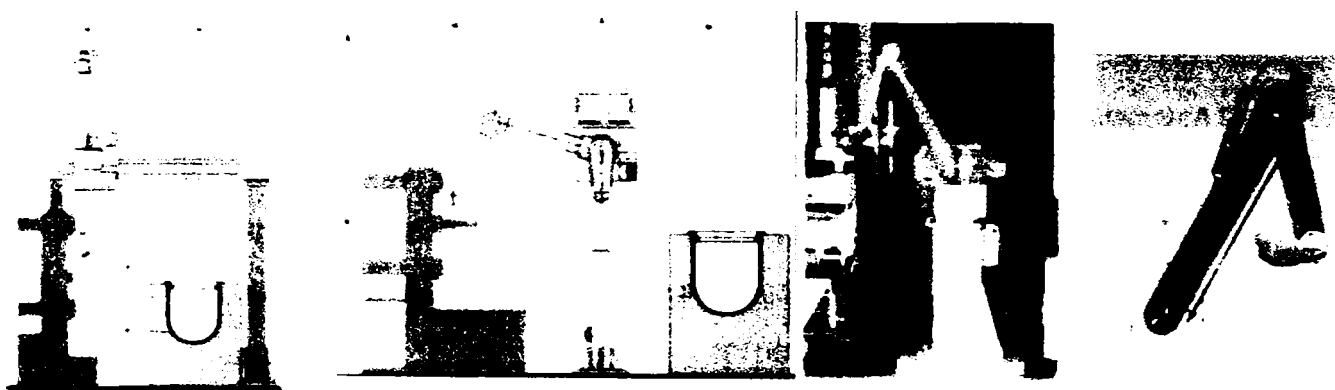


Fig. 143 Roboți ce manipulează oala de turnare cu aliaj topit.

5.3 Evacuarea pieselor din matriță utilizând roboți și manipulatoare

Evacuarea pieselor din matrițe se realizează automat utilizând manipulatoare și roboți industriali figura 144.



Fig. 144 Manipulatoare ce servesc mașina de turnat sub presiune

În figura 145 este prezentat un robot ce servește o mașină de turnat sub presiune în sensul evacuării piesei din spațiul de lucru al mașinii de turnat sub presiune și depunerea acesteia în matrița de debavurat.

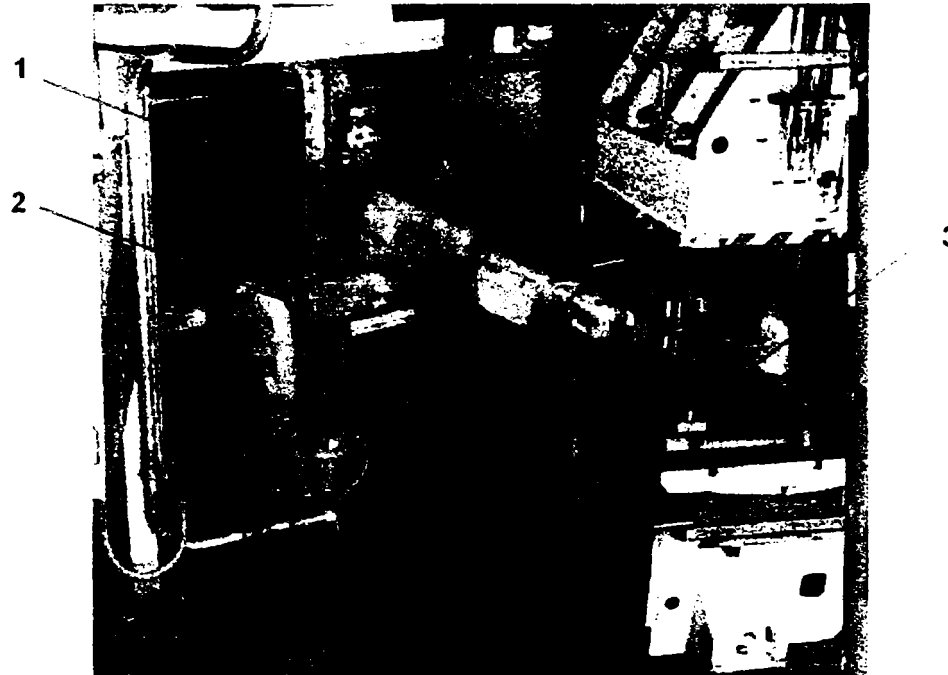


Fig. 145 Robot ce servește mașina de turnat sub presiune.
1- mașină de turnat sub presiune; 2- robot; 3 – presă de debavurat.

Forma constructivă a dispozitivelor de prehensiune a roboților depinde de forma piesei tumate care trebuie manipulată, greutatea ei, starea de rigiditate și gradul de precizie pozițional cerut.

În figura 146 se prezintă diferite soluții constructive a dispozitivelor de prehensiune.

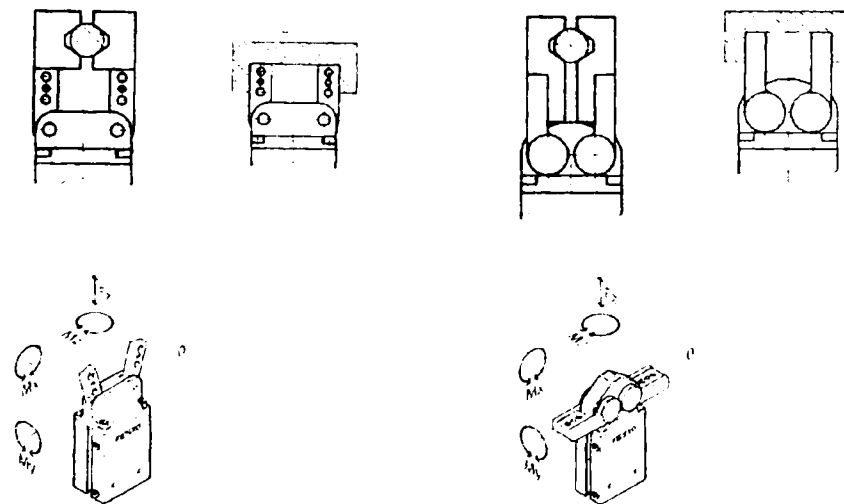


Fig.146 Elemente de prehensiune ale unui robot pentru piese tumate sub presiune

În figura 147 este prezentată o mașină de turnat sub presiune servită de roboți.

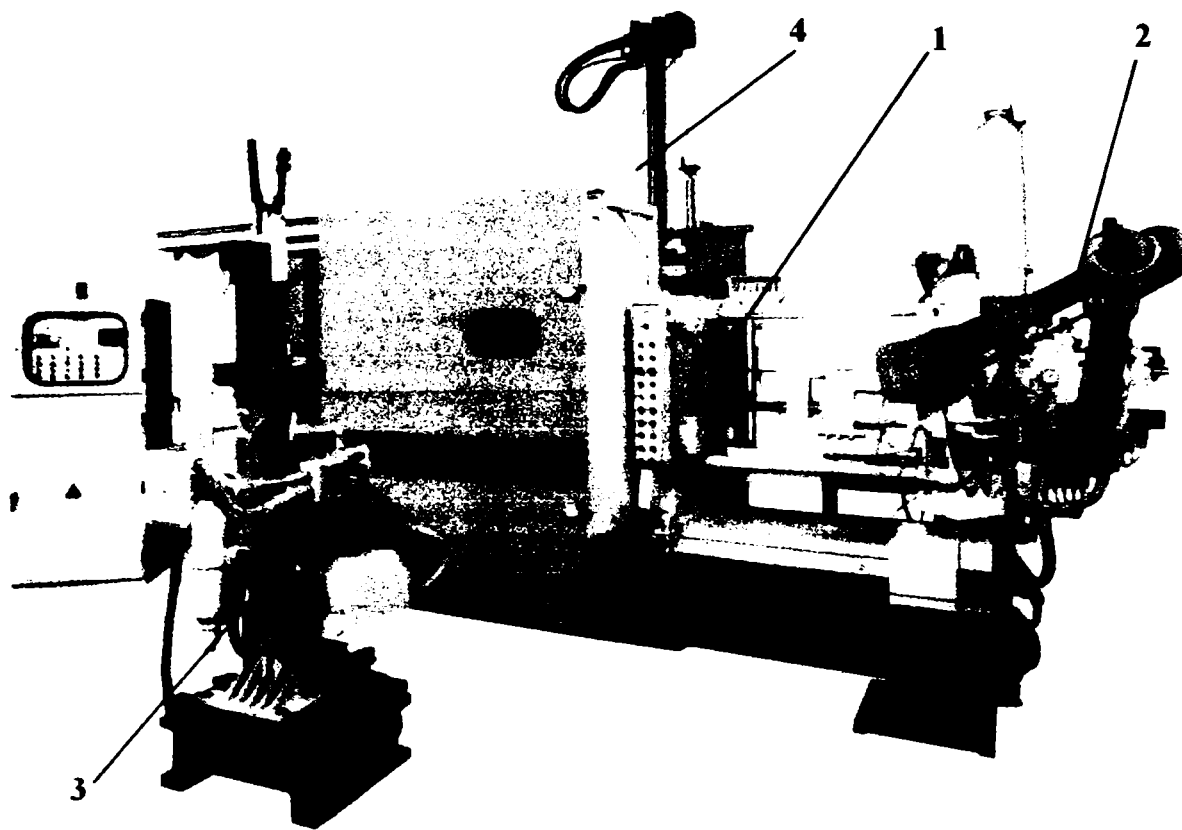


Fig.147 Mașină de turnat sub presiune servită de roboți;
1- mașina de turnat sub presiune; 2 – manipulator de oală de turnare; 3 – robot de evacuare piese turnate;
4 – automat de lubrifiere matriță

5.4 Sisteme de schimbare a matrițelor de turnat sub presiune

Introducerea de către diferite firme a unor sisteme automate de schimbare a matriței a determinat creșterea gradului de automatizare a procesului de turnare sub presiune.

Sistemele de schimbare a matrițelor se pot împărți în funcție de direcția de schimbare a matriței în:

- Sisteme de schimbare orizontale;
- Sisteme de schimbare verticale.

Sisteme de schimbare orizontale

Sistemele de schimbare orizontale pot fi:

- de tip placă;
- de tip cărucior.

Sistemul de schimbare de tip masă este o soluție constructivă staționară. Schimbarea matrițelor se face rapid, în mai puțin de 2 minute. În figura 148 este prezentată soluția constructivă pentru schimbarea a două matrițe.

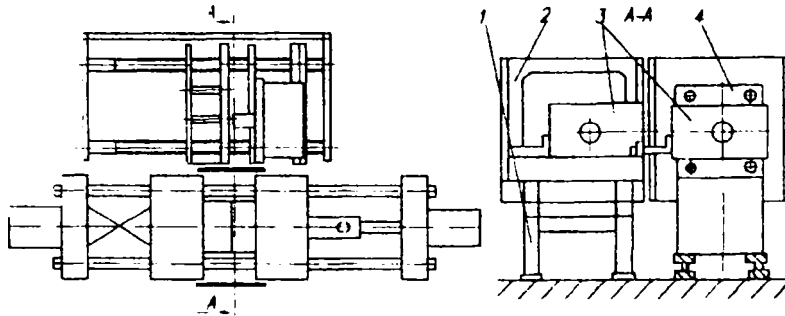


Fig. 148 Masă pentru schimbarea automată a matriței;
1- masa; 2- grilaj de protecție; 3- matrițe; 4- mașina de turnat sub presiune.

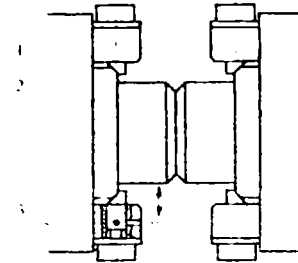


Fig.149 Sisteme de fixare a matriței;
1- platoul mobil al mașinii; 2- matrițe; 3- cilindru pneumatic; 4- platou fix al mașinii de turnat sub presiune.

Sistemul din figura 149 folosește pentru fixare cilindrii pneumatici, așezați pe fețele platourilor de prindere ale mașinii, care cu ajutorul tijelor realizează o fixare conică pe plăcile de prindere ale matriței.

Sistemul din figura 150 folosește pentru fixare cilindrii pneumatici, așezați pe fețele laterale ale platourilor de prindere ale mașinii, și care cu ajutorul tijelor realizează o fixare conică în coloanele de fixare ale matriței.

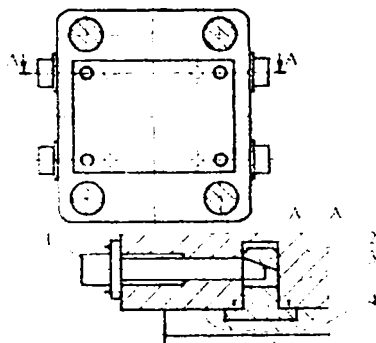


Fig.150 Sisteme de fixare a matriței;
1- cilindru pneumatic; 2- coloană de fixare;
3- platou mașină; 4- matrițe.

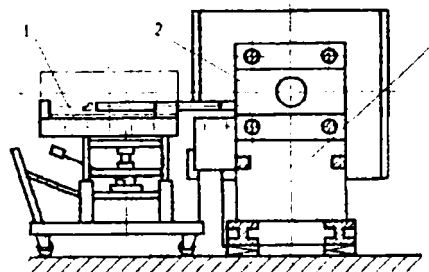


Fig.151 Sistem de schimbare a matriței cu cărucior acționat manual;
1- cărucior; 2- matrița; 3- mașina.

Un alt tip de schimbare orizontală a matrițelor de turnat sub presiune este cel de tip cărucior, care poate fi:

- cărucior acționat manual pentru matrițe mai mici figura 151;
- carucior pe șine pentru matrițe grele și foarte grele figura 152 și 153.

La sistemul de schimbare cu cărucior pe șine, căruciorul se poate mișca între două rânduri de mașini de turnat sub presiune fiind dotat cu un singur post de încărcare și masă rotativă figura 152. Sistemul de schimbare a matriței pe mai multe rânduri de mașini este prezentat în figura 153.

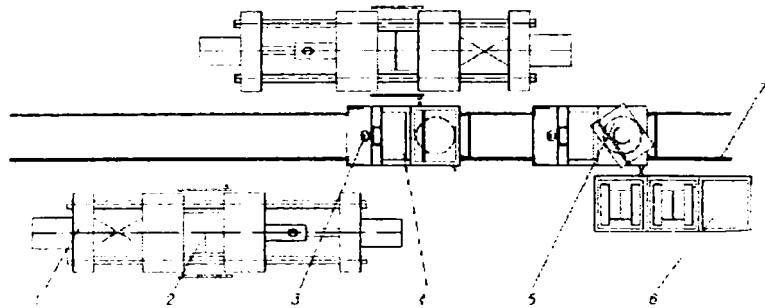


Fig.152 Sistem de schimbare a matriței cu cărucior pe șine;
1- mașina; 2- matrița; 3- operator; 4- cărucior; 5- masa rotativă;
6- magazie; 7- șina.

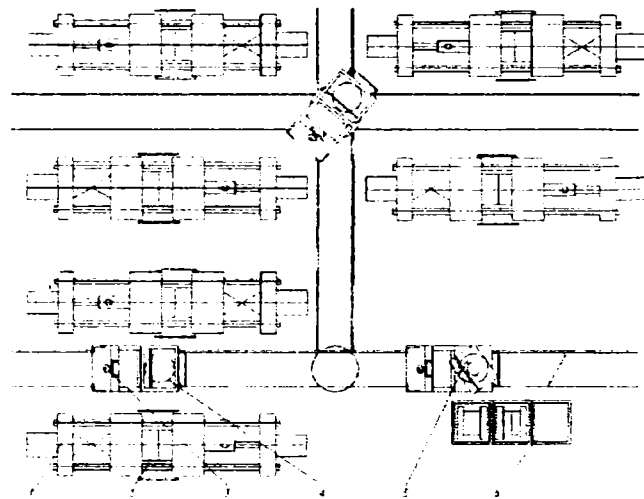


Fig.153 Sistem de schimbare a matriței pe mai multe rânduri de mașini cu cărucior pe șine;
1- mașina; 2- matrița; 3- operator; 4- cărucior; 5- placa turnantă; 6- magazie; 7- șina.

Sisteme de schimbare verticale

Sistemele de schimbare verticale pot fi:

- de tip robot portal;
- de tip macara.

Sistemul de schimbare a matriței cu robot portal este prezentată în figura 154. Acest sistem asigură schimbarea automată a matriței precum și transportul la magazie. Robotul posedă două brațe verticale de prindere 2 cu ajutorul cărora se fixează matrițele prin intermediul sistemului de pretensiune. Portalul asigură

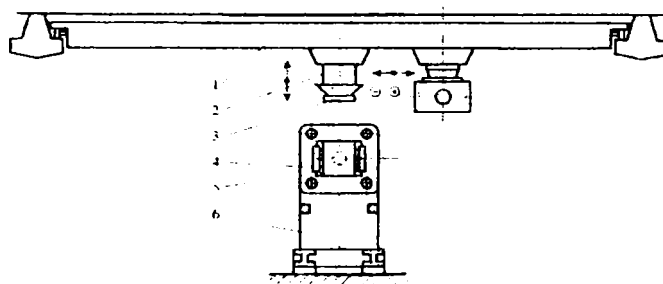


Fig.154 Sistem de schimbare a matriței cu robot portal.
1- portal; 2- braț vertical; 3- dispozitivul de pretensiune;
4- sistem de fixare a matriței; 5- matriță; 6- mașina.

transportul matriței între mașini
și pâna la magazie.

5.5 Sisteme de transport a pieselor turnate

Pentru transportul pieselor turnate din zona mașinii de turnat sub presiune există diferite variante constructive figura 155.

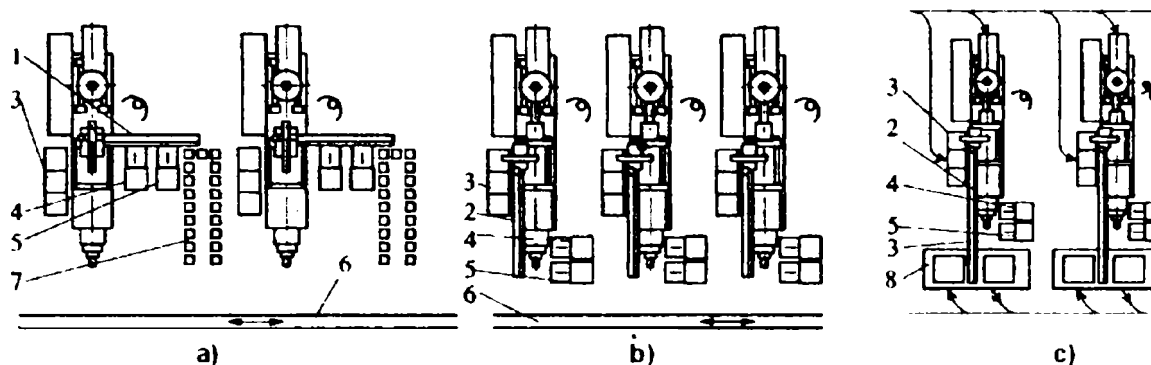


Fig.155 Variante constructive de transport a pieselor turnate sub presiune.

1- robot cu transport transversal; 2- robot cu transport longitudinal; 3- schimbător de matrițe; 4- montaj; 5- asigurarea calității; 6- banda transportoare; 7- banda transportoare intermediară 8- masa de stivuire.

În varianta 155 a transportul pieselor din zona mașinii de turnat sub presiune se realizează prin robotul transversal 1 la banda transportoare 7 și apoi la banda transportoare 6.

În varianta din figura 155 b transportul pieselor din zona mașinii se realizează prin robotul longitudinal 2 la banda transportoare finală.

În varianta din figura 155 c transportul pieselor de dimensiuni mari se realizează prin robotul longitudinal 2 până la o masă de stivuire 8 unde se face asezarea pe paleți.

În figura 156 este prezentat un robot ce manipulează piese turnate.



Fig. 156 Robot ce manipulează piese turnate sub presiune

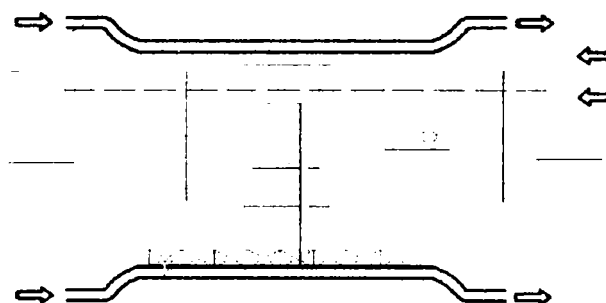


Fig.157 Sistem automatizat la o mașină de turnat sub presiune;

1- banda transportoare pentru piese turnate sub presiune; 2- sistem de transport matriță; 3- sistem de transport aliaj topit; 4- furnizare de date de la calculator și sistemul CAM.

Un sistem automat integrat al unei mașini de turnat sub presiune poate cuprinde toate sistemele automate prezentate anterior figura 157.

5.6 Tipuri de roboți utilizați în sectoarele de turnare sub presiune

La un prim contact cu piața (fluxul de oferte) utilizatorul trebuie să primească un grup restrâns de informații, eventual exprimate în cifre, care să caracterizeze roboții, și care să-i permită acestuia orientarea către robotul ce ar putea satisface nevoile sale.

Prospectele oferite de firmele producătoare de roboți redau o gamă de caracteristici legate de robot, caracteristici considerate de bază.

Caracteristicile redată în prospecte sunt:

- o serie de informații (necifrate) care dau prima imagine asupra robotului:
 - structura;
 - domeniul de aplicații;
 - echipament special și accesorii.
- Grup de informații în cifre, deci având o adresă bine precizată:
 - număr de axe;
 - caracteristicile axelor: raza de acțiune, viteza;
 - sarcina nominală;
 - sarcina suplimentară;
 - sarcina totală;
 - precizia;
 - spațiul de lucru;
 - raza de acțiune (conform desenului);
 - greutate etc.
- o informație despre dulapul de comandă.

Cunoașterea spațiului de lucru al robotului (care este cel al mecanismului generator de traiectorie) prezintă importanță pentru organizarea aplicațiilor lui.

Spațiul de lucru definit mai sus este unul teoretic. El nu poate fi utilizat integral din cauza unor limitări tehnice. Spațiul de lucru teoretic se subdivizează în spațiul de lucru util și spațiul neutilizabil.

Spațiul de coliziune al unui robot este mulțimea pozițiilor posibile ale punctelor materiale aparținând obiectului manipulat, sau elementelor robotului.

Un obiect sau o persoană care pătrunde în spațiul de coliziune riscă să fie izbit de obiectul manipulat. Pentru evitarea acestor pericole se definește spațiul de protecție ca unul mai mare decât spațiul de coliziune. În spațiul de protecție se interzice accesul persoanelor și instalarea diferitelor obiecte.

Pe lângă acești parametri constructorii evidențiază și alți parametri ce au rolul de a completa imaginea formată despre robot:

- tipul acționării;
- tipul comenzii;
- puterea consumată; masa robotului.

Robot	PRAM - 02
Destinație	Serviri mașinilor de turnat sub presiune
Capacitate de încărcare	
Eroarea de poziționare a elementului de execuție	± 1 mm
Numerul brațelor	1
Modul de amplasare la locul de munca	Pe podea
Viteza de așarilor unghiulare	$9^\circ / \text{sec}$
Modul de comandă	Punct cu punct
Procedeu de programare	Învățare
Masa	1550 kg

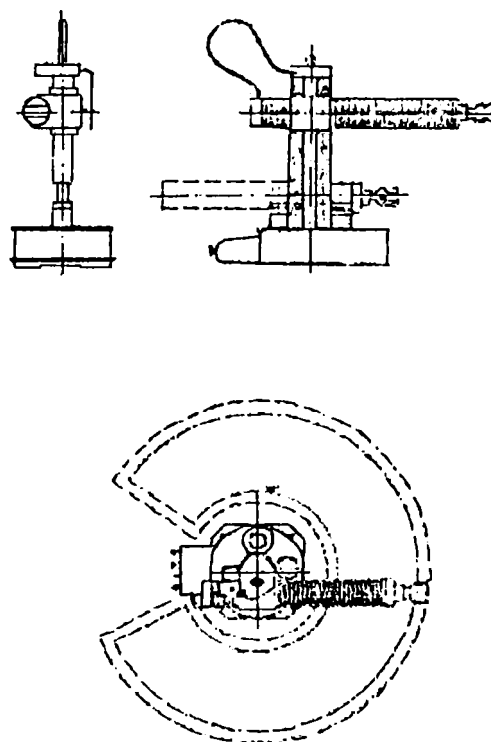


Fig.158 Caracteristicile robotului PRAM-02

Robot	Mepo 7
Destinație	Serviri mașinilor de turnat sub presiune
Capacitate de încărcare	30 – 60 kg
Eroarea de poziționare a elementului de execuție	± 1 mm
Numărul brațelor	1
Modul de amplasare la locul de muncă	Pe podea
Puterea consumată	7.5 kW
Modul de comandă	Punct cu punct
Procedeu de programare	Învățare
Masa	1600 kg
Producător	România

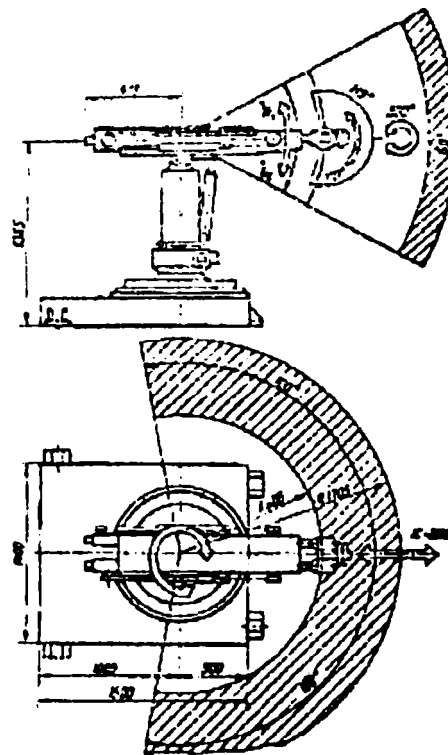
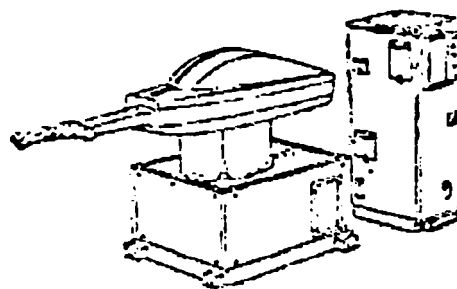


Fig.159 Caracteristicile robotului MEPO-07

Robot	RIMP 1000
Destinație	Serviri mașinilor de turnat sub presiune
Capacitate de încărcare	60 kg
Eroarea de poziționare a elementului de execuție	± 1.5 mm
Numărul brațelor	1
Modul de amplasare la locul de muncă	Pe podea
Viteza deplasării liniare	0.75 m / s
Puterea consumată	12 kW
Modul de comandă	Punct cu punct
Procedeu de programare	Învățare
Masa	1100 kg



Vedere generală

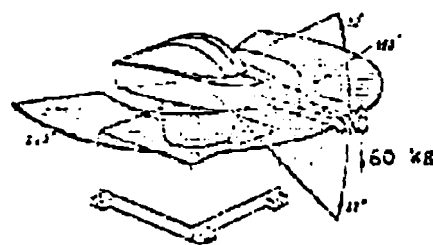


Fig.160 Caracteristicile robotului RIMP-1000

Robot	IRB - 60
Destinație	Serviri masinilor de turnat sub presiune
Capacitate de incarcare	60 kg
Eroarea de pozitionare a elementului de executie	± 0.4 mm
Numarul bratelor	1
Modul de amplasare la locul de munca	Pe odea
Viteza deplasarii liniare	0.75 m / s
Puterea consumata	7 kW
Modul de comanda	Continuu, punct cu punct
Procedeu de programare	Invatare
Masa	750 kg

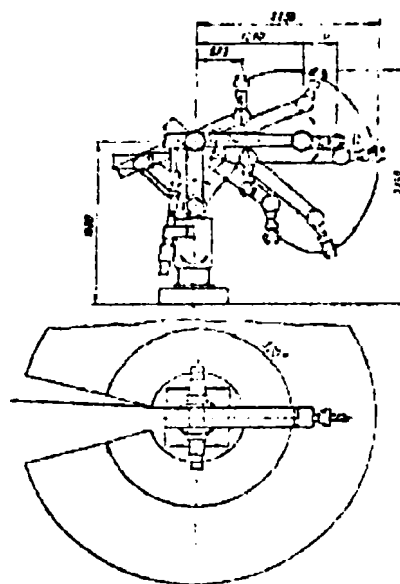


Fig.161 Caracteristicile robotului IRB-60

Robot	RIMP - 401
Destinație	Serviri masinilor de turnat sub presiune
Capacitate de incarcare	6 kg
Eroarea de pozitionare a elementului de executie	± 0.3 mm
Numarul bratelor	1
Modul de amplasare la locul de munca	Pe podea
Viteza deplasarii liniare	0.6 / s
Puterea consumata	7 kW
Modul de comanda	Continuu, punct cu punct
Procedeu de programare	Invatare
Masa	50 kg

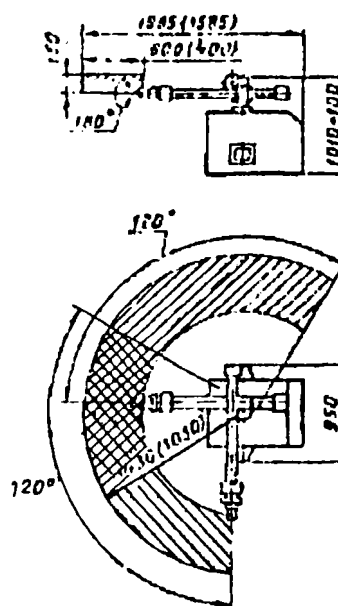


Fig.162 Caracteristicile robotului RIMP-404

Robot	MTE-55/E
Destinație	Serviciu masinilor de turnat sub presiune
Capacitate de încărcare	5 kg
Eroarea de poziționare a elementului de execuție	± 0.2 mm
Numărul br. telor	1
Modul de amplasare la locul de muncă	Pe podea
Viteza deplasării liniare	0.4 m / s
Viteza deplasării unghiulare	8 - 84 grade / s
Puterea consumată	0.5 kW
Procedeu de programare	Invatare
Masa	440 kg

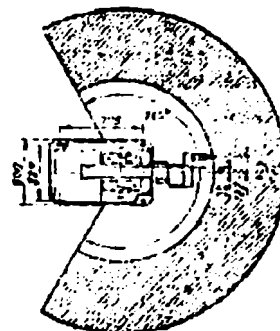
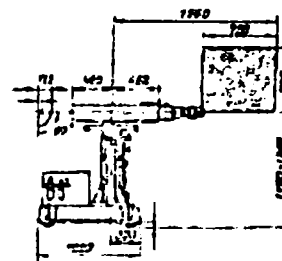


Fig.163 Caracteristicile robotului RIMP-401

Robot	MP-100N
Destinație	Serviciu masinilor de turnat sub presiune
Capacitate de încărcare	10 kg
Eroarea de poziționare a elementului de execuție	± 1 mm
Numărul brațelor	1
Modul de amplasare la locul de muncă	Pe podea
Puterea consumată	0.2 kW
Modul de comandă	Punct cu punct
Masa	125 kg
Fabricat	România

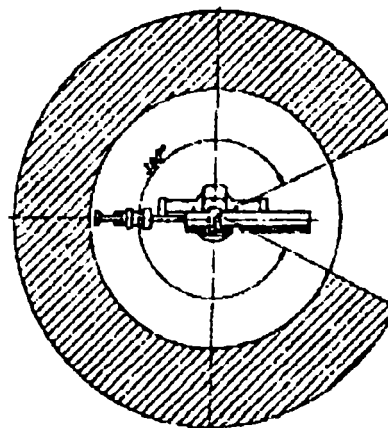
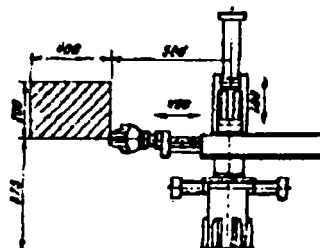


Fig.164 Caracteristicile robotului MP-100N

5.7. Modelul matematic al operației de turnare sub presiune

Mașinile de turnat sub presiune sunt acele mașini de lucru care lucrează prin formare și sunt incluse în sistemele de fabricație flexibilă. Automatizarea funcționării acestor mașini presupune comanda automată a acționării dispozitivelor care aduc materia primă, a organelor de lucru (pistonul) și a dispozitivelor de evacuare ale obiectelor turnate. Conducerea numerică a axelor unei mașini unelte se realizează în mod similar cu cea a axelor unui robot.

5.7.1 Modelul matematic al programului de manipulare al robotului

Se înțelege prin programul de manipulare (mișcare) al unui robot, succesiunea în timp a secvențelor de manipulare ale obiectului manipulat. Secvența de manipulare (mișcare) se numește trecerea obiectului de la o situație la alta. [K.9]

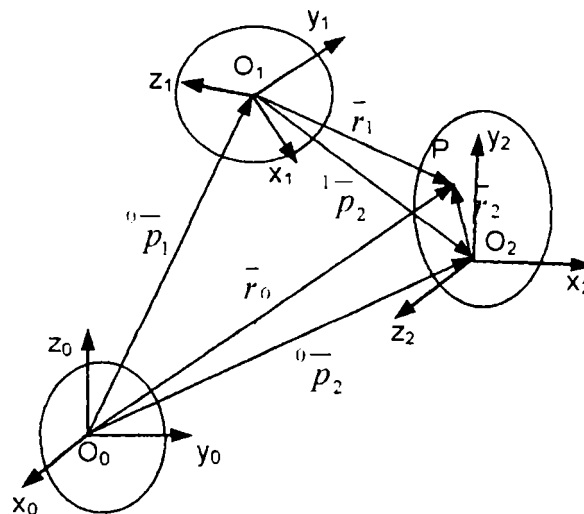


Fig. 165 Trei situații succesive 0, 1 și 2 ale unui corp.

În figura 165 s-au reprezentat situațiile succesive 0, 1 și 2 ale aceluiași corp. Corpului i se atașează sistemul de referință cartezian $O_i x_i y_i z_i$ ($i = 0, 1, 2$)

${}^0\vec{p}_1$ - vectorul de poziție al punctului O_1 în raport cu originea O_0 a sistemului de referință atașat corpului în poziția 0.

${}^0\vec{p}_2$ - vectorul de poziție al punctului O_2 în raport cu originea O_0 .

${}^1\bar{p}_2$ - vectorul de poziție al punctului O_2 în raport cu originea O_1 a sistemului de referință atașat corpului 1.

\bar{r}_1, \bar{r}_2 - sunt vectorii de poziție a punctului P aparținând corpului 2 în raport cu O_1 respectiv O_2 .

Între vectorii \bar{r} și \bar{p} se pot scrie relațiile:

$$\begin{cases} \bar{r}_1 = \bar{r}_2 + {}^1\bar{p}_2 \\ \bar{r}_0 = \bar{r}_2 + {}^0\bar{p}_2 = \bar{r}_1 + {}^0\bar{p}_1 \end{cases} \quad (194)$$

relațiile (194) pot fi scrise matricial astfel:

$$\begin{cases} \underline{r}_1 = {}^1T_2 \cdot \underline{r}_2 \\ \underline{r}_0 = {}^0T_2 \cdot \underline{r}_2 \end{cases} \quad (195)$$

Putem scrie următoarea relație între operatori:

$${}^0T_2 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \quad (196)$$

unde operatorul de trecere din sistemul O_2 în sistemul O_0 este:

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} \cos(x_2x_0) & \cos(y_2x_0) & \cos(z_2x_0) & {}^0p_{2x} \\ \cos(x_2y_0) & \cos(y_2y_0) & \cos(z_2y_0) & {}^0p_{2y} \\ \cos(x_2z_0) & \cos(y_2z_0) & \cos(z_2z_0) & {}^0p_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (197)$$

$$\text{unde: } \begin{cases} \cos(x_2x_0) = n_{2x} \\ \cos(x_2y_0) = n_{2y} \\ \dots\dots\dots \\ \cos(z_2z_0) = a_{2z} \end{cases} \quad (198)$$

${}^0p_{2x}, {}^0p_{2y}, {}^0p_{2z}$ sunt proiecțiile vectorului ${}^0\bar{p}_2$ pe axele sistemului O_0 .

$n_{2x}, n_{2y}, n_{2z}, \dots, a_{2z}$ sunt proiecțiile versorilor atașați axelor sistemului O_2 pe axele sistemului O_0 .

Operatorul 0T_2 dat de relația (6.4) devine:

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} n_{2x} & o_{2x} & a_{2x} & {}^0p_{2x} \\ n_{2y} & o_{2y} & a_{2y} & {}^0p_{2y} \\ n_{2z} & o_{2z} & a_{2z} & {}^0p_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (199)$$

Matricea dată de relația (199) se numește matrice de situație întrucât descrie situația sistemului O_2 în raport cu sistemul de referință O_0 .

5.7.2 Elaborarea modelului matematic a mișcării pistonului mașinii de turnat sub presiune

În cazul propriu-zis al turnării sub presiune fig. 166 pistonul (P) acționează asupra aliajului topit aflat în camera de compresie.

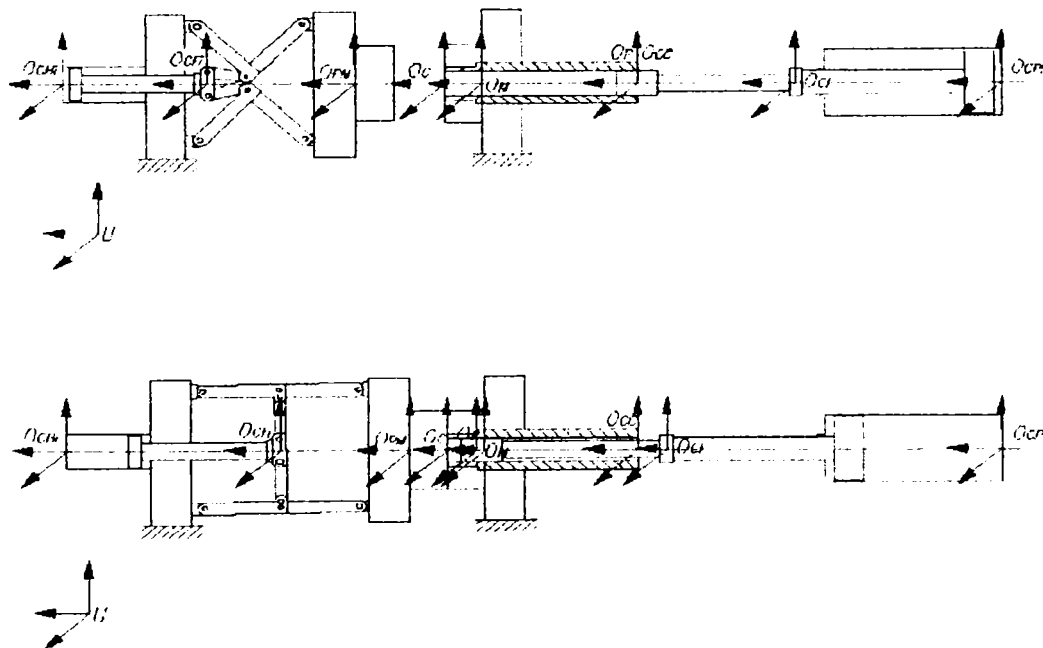


Fig. 166 Mașina de turnat sub presiune

Se atașează sisteme de referință fiecărei componente a sistemului. Sistemul de referință universal U se consideră legat de podeaua atelierului în care urmează a se executa operația.

Se urmărește asigurarea în timp a unei poziții relative a pistonului (P) față de duza (D) în conformitate cu procesul tehnologic de turnare sub presiune (determinarea unei legi de mișcare a pistonului P astfel încât să asigure umplerea cavității matriței în conformitate cu procesul tehnologic de turnare sub presiune).

Situarea pistonului (P) față de sistemul (U) poate fi exprimat prin produse de matrici, care descriu trecerile succesive de efectuat prin sistemele de referință intermediare atașate diferitelor componente ale sistemului de fabricație.

Pentru succesiunea de componente dintre (P) și (U) al atelierului aleasă astfel încât să includă camera de presiune hidraulică (CPh) figura 167 este:

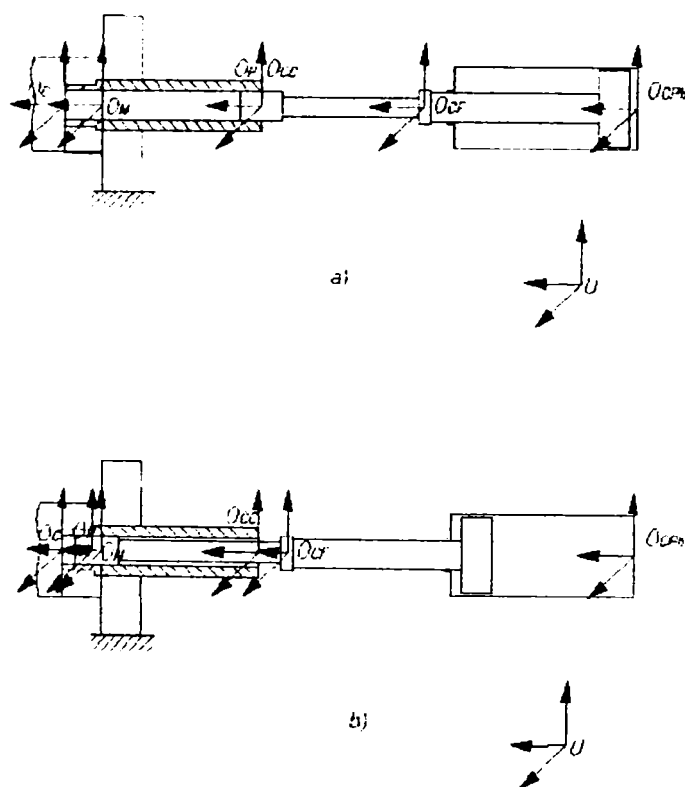


Fig.167 Situația pistonului P față de univers U ;
a- faza de alimentare cameră de compresie CC; b- faza de sfârșit de umplere matriță.

$${}^U \underline{T}_P = {}^U \underline{T}_{CPH} \cdot {}^{CPH} \underline{T}_{CF} \cdot {}^{CF} \underline{T}_P \quad (200)$$

unde:

${}^U \underline{T}_{CPH}$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat camerei de presiune hidraulică la sistemul universal;

$${}^U \underline{T}_{CPH} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (201)$$

${}^{CPH} \underline{T}_{CF}$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat capului de forță la sistemul atașat camerei de presiune hidraulică;

$${}^{CPH} \underline{T}_{CF} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{pl} + z(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (202)$$

$${}^{CF} \underline{T}_P = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (203)$$

Pentru succesiunea de componente dintre piston și sistemul universal al atelierului aleasă ca să includă și matricea figura 166 se poate scrie:

$${}^U \underline{T}_P = {}^U \underline{T}_{CHI} \cdot {}^{CHI} \underline{T}_{CFi} \cdot {}^{CFi} \underline{T}_{PM} \cdot {}^{PM} \underline{T}_C \cdot {}^C \underline{T}_M \cdot {}^M \underline{T}_{CC} \cdot {}^{CC} \underline{T}_P \quad (204)$$

unde:

${}^U \underline{T}_{CHI}$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat cilindrului hidraulic de închidere (CHi) la sistemul de referință (U);

${}^{CHI} \underline{T}_{CFi}$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat capului de forță (CFi) la sistemul de referință atașat cilindrului hidraulic de închidere (CHi);

${}^{CFi} \underline{T}_{PM}$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat plăcii mobile (PM) a mașinii la sistemul de referință atașat capului de forță (CFi);

${}^{PM} \underline{T}_C$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat cochilei (C) la sistemul de referință atașat plăcii mobile (PM);

${}^C \underline{T}_M$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat mașinii (M) la sistemul de referință atașat cochilei (C);

${}^M \underline{T}_{CC}$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat camerei de compresie (CC) la sistemul de referință atașat mașinii (M);

${}^{CC} \underline{T}_P$ - matricea de trecere de la sistemul de referință atașat pistonului la sistemul de referință atașat camerei de compresie (CC);

Egalând relațiile (200) și (204) rezultă:

$${}^U \underline{T}_{CPH} \cdot {}^{CPH} \underline{T}_{CF} \cdot {}^{CF} \underline{T}_P = {}^U \underline{T}_{CHI} \cdot {}^{CHI} \underline{T}_{CFi} \cdot {}^{CFi} \underline{T}_{PM} \cdot {}^{PM} \underline{T}_C \cdot {}^C \underline{T}_M \cdot {}^M \underline{T}_{CC} \cdot {}^{CC} \underline{T}_P \quad (205)$$

unde matricile de transfer (9) pot fi exprimate prin constante cunoscute și anume:

Din relația (205) se poate calcula matricea de trecere a capului de forță față de sistemul de referință fix atașat cilindrului hidraulic.

$${}^{CPH} \underline{T}_{CF} = {}^U \underline{T}_{CPH}^{-1} \cdot {}^U \underline{T}_{CHI} \cdot {}^{CHI} \underline{T}_{CFi} \cdot {}^{CFi} \underline{T}_{PM} \cdot {}^{PM} \underline{T}_C \cdot {}^C \underline{T}_M \cdot {}^M \underline{T}_{CC} \cdot {}^{CC} \underline{T}_P \cdot {}^{CPH} \underline{T}_P^{-1} \quad (206)$$

unde:

${}^{CC} \underline{T}_P$ - variază în funcție de procesul tehnologic de tumare sub presiune și în consecință și matricea ${}^{CPH} \underline{T}_{CF}$ va rezulta variabilă în timp iar aceeași variație trebuie asigurată prin mișcări relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare:

$${}^{CPH} \underline{T}_{CF} = {}^{CPH} \underline{T}_{CF}(t) \quad (207)$$

5.8 Determinarea poziției pistonului în timpul procesului de turnare sub presiune.

În figura 168 este prezentat pistonul și pozițiile sale succesive pe care la ia în timpul procesului de turnare sub presiune

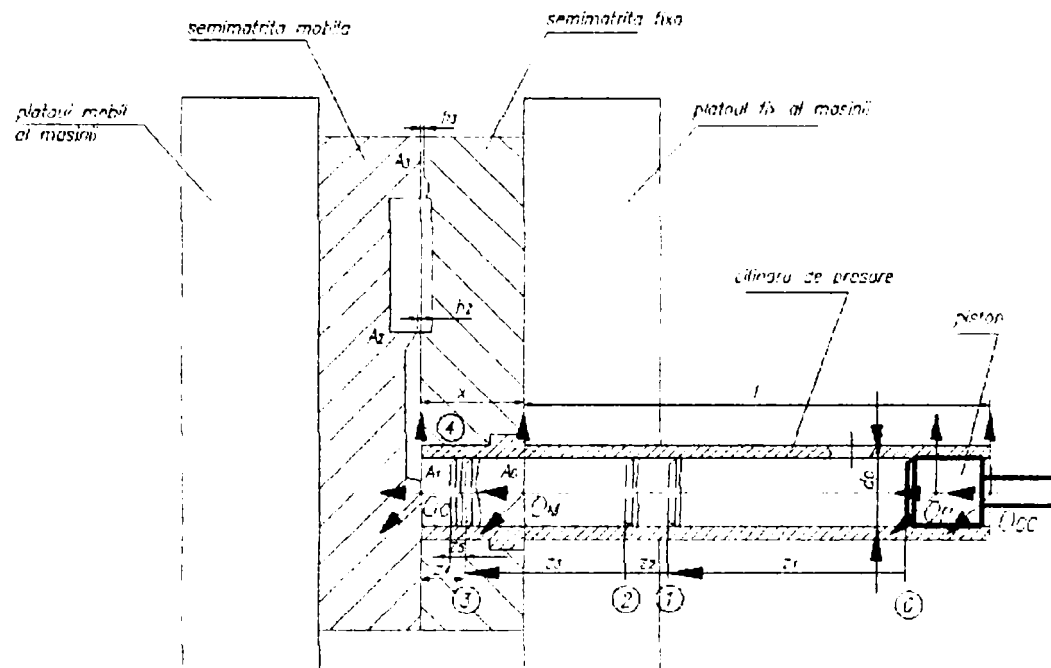


Fig. 168 Pozițiile succesive pe care le ocupă pistonul în timpul procesului de turnare sub presiune; 0- poziția inițială a pistonului; 1- poziția pistonului în momentul când întreg perimetrul camerei de compresie este udat; 2- poziția pistonului în momentul umplerii rețelei de turnare; 3 – poziția pistonului în momentul umperii cavității forme de turnare; 4 – poziția pistonului în urma compactizării aliajului.

În faza de alimentare cameră de compresie cu aliaj topit originea sistemului de axe atașat pistonului se suprapune peste cel atașat camerei de compresie $O_p \equiv O_{CC}$.

Umplerea matriței se realizează când pistonul se mișcă din poziția 0 în poziția 1 deplasare în urma căreia aliajul topit umple întregul perimetru al camerei de compresie CC. Matricea de trecere de la sistemul de referință atașat pistonului la sistemul de referință atasat camerei de compresie CC aferent acestei deplasări este:

$${}^{CC}T_P = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (208)$$

z_1 – depinde de volumul de aliaj topit necesar umplerii cavității formei și a rețelei de tumare și de diametrul pistonului de tumare d_p ; această deplasare se realizează într-un timp t_1 .

1-2 deplasarea pistonului în vederea umplerii rețelei de tumare, matricea (208) devine:

$${}^{CC}T_P = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 + z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (209)$$

unde z_2 depinde de volumul cavității rețelei de tumare; această deplasare executându-se în timpul t_2 .

2-3 deplasarea pistonului în vederea umplerii cavității amprentă. Pentru situația când pistonul se găsește în poziția (3) matricea de trecere (209) devine:

$${}^{CC}T_P = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 + z_2 + z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (210)$$

z_3 – depinde de volumul cavității amprentă; deplasarea realizându-se într-un timp t_3 ;

Mișcarea pistonului din poziția 3 în poziția 4 corespunde procesului de îndesare a aliajului. Matricea (210) pentru situarea pistonului în poziția 4 devine:

$${}^{CC}T_P = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 + z_2 + z_3 + z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (211)$$

z_4 – depinde de contractia aliajului și de gradul de complexitate al piesei, deplasarea este caracterizată de timpul t_4 ;

În general matricea de trecere de la sistemul de referință atașat pistonului P la sistemul de referință atașat camerei de compresie CC este o matrice ce exprimă o translație în lungul axei Oz.

$${}^{CC}T_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (i = 1,4) \quad (212)$$

unde t este timpul necesar umplerii cavității amprentă care împreună cu timpul de menținere stabilește durata de menținere a piesei în matriță.

Simularea umplerii cavității unei matrițe în conformitate cu precizările făcute anterior în ceea ce privește situarea pistonului față de camera de compresie și modul de umplere al cavității matriței este redată în figurile 169 și 170 pentru două repere diferite.

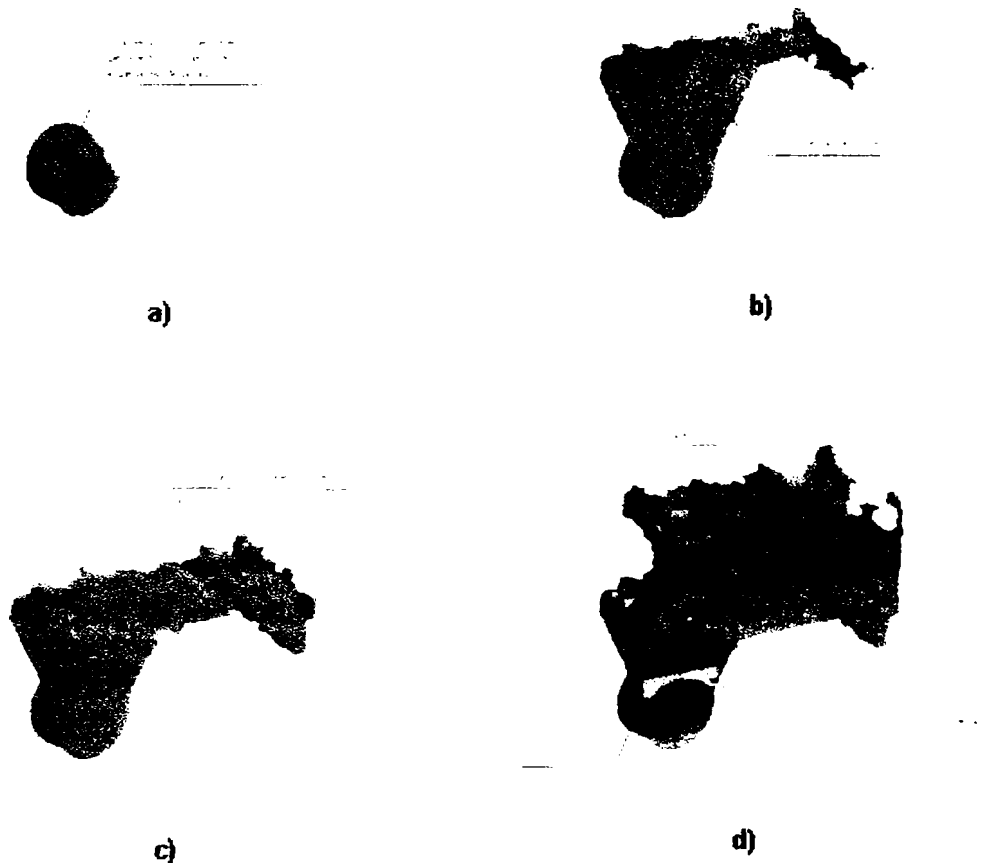


Fig.169 Simularea umplerii cavității matriței în conformitate cu procesul de turnare sub presiune și a poziției pistonului în acest timp.
a- întreg perimetrul camerei de compresie este udat; b- umplerea rețelei de turnare cu aliaj topit; c- umplere cavitate amprentă; d- compactizare și menținere pentru solidificarea sub presiune

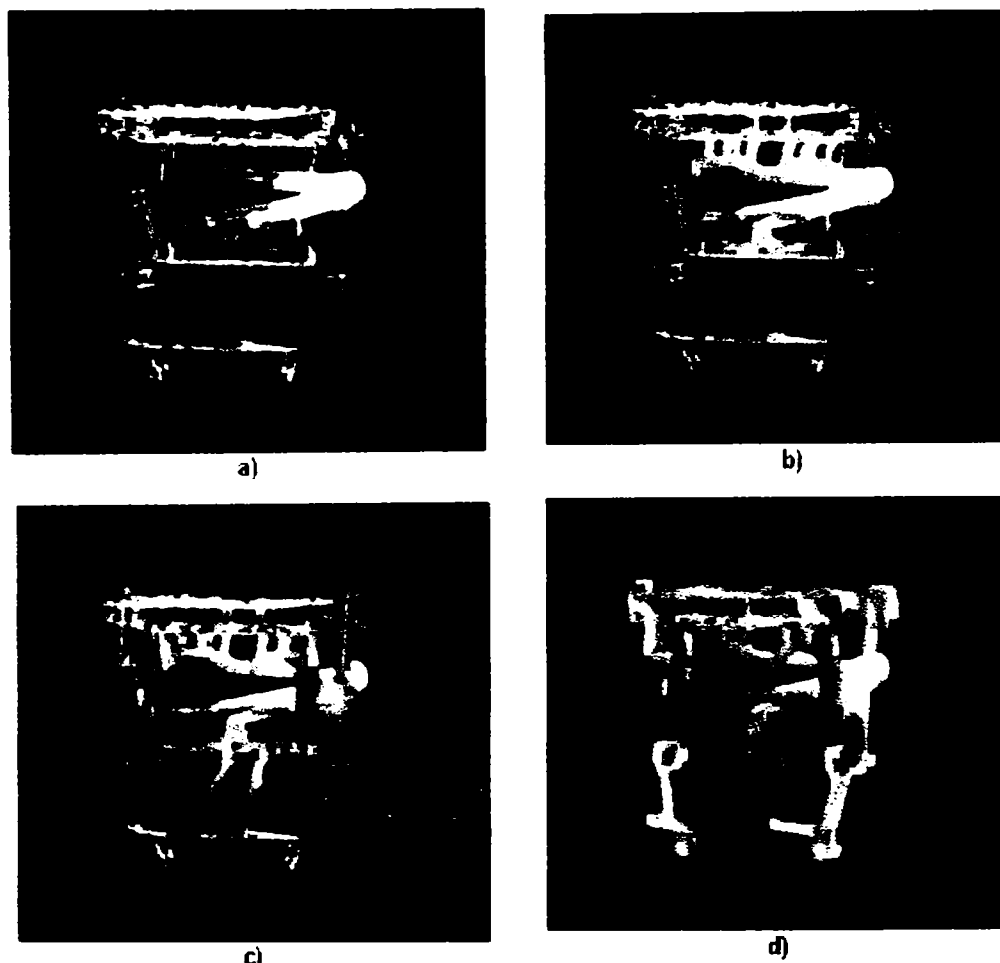


Fig.170 Simularea umplerii cavității matriței în conformitate cu procesul de turnare sub presiune și a poziției pistonului în acest timp.

a- întreg perimetrul camerei de compresie este udă; b- umplerea rețelei de turnare cu aliaj topit; c- umplere cavitare amprentă; d- compactizare și menținere pentru solidificarea sub presiune.

5.9 Funcțiile de comandă ale axelor de robot

Se înțelege prin *funcție de comandă* legea de variație în timp a parametrilor cinematici comandați ai cuplelor cinematice conducătoare ale dispozitivului de ghidare al robotului [K 11]

Programul de manipulare al robotului trebuie să prescrie modificarea coordonatelor punctului caracteristic cu cantitățile:

$$\begin{cases} \Delta x = x_2 - x_1 \\ \Delta y = y_2 - y_1 \\ \Delta z = z_2 - z_1 \end{cases} \quad (222)$$

Dacă axele sistemului de referință Oxyz se aleg paralele cu axele de translație ale mecanismului, deplasările $\Delta x, \Delta y$ și Δz vor fi chiar deplasările relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare.

Comanda acestor deplasări se poate realiza în patru moduri diferite, după care se deosebesc *tipurile de comandă* [K11].

1. Comanda secvențială

La acest tip de comandă efectuarea deplasărilor $\Delta x, \Delta y$ și Δz sunt comandate succesiv. Ca urmare, atât timp cât elementele cuplei cinematice A execută mișcare relativă, cele aferente cuplelor cinematice B și C se mențin în repaus. Astfel, punctul caracteristic trece din P1 în P2 prin punctele intermediare P' și P".

2. Comanda punct cu punct (PTP, point to point)

În acest caz toate mișcările relative ale elementelor cuplelor cinematice comandate se realizează simultan, începând cu același moment de pornire t_1 și terminând cu același moment de oprire t_2 . Ca urmare, pentru $t = t_1$ și $t = t_2$ proiecțiile vitezei punctului P pe axele sistemului de referință trebuie să satisfacă relațiile:

$$\begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = 0 \\ v_z = 0 \end{cases} \quad (223)$$

În intervalul de timp (t_2-t_1) , între vitezele de deplasare după cele trei axe nu se prescriu nici un fel de legături; ele pot varia după orice lege în timp, dar trebuie să fie continue pentru a îndeplini condițiile:

$$\begin{cases} \Delta x = \int_{t_1}^{t_2} v_x dt \\ \Delta y = \int_{t_1}^{t_2} v_y dt \\ \Delta z = \int_{t_1}^{t_2} v_z dt \end{cases} \quad (224)$$

Pentru fiecare lege de viteză, deplasarea în spațiul cartezian se realizează după o anumită traiectorie, care se intersectează în P_1 și P_2 numite *puncte de programare* [K11].

3. Comanda multipunct (MP, multipoint)

Comanda multipunct seamănă cu cea punct cu punct, cu deosebirea că în acest caz numărul punctelor de programare este mai mare. Se pune condiția, ca traiectoria dintre punctele P_1 și P_2 să treacă prin punctele de programare intermediare.

4. Comanda de traiectorie continuă (CP, continuous path)

În cazul acestui tip de comandă punctul caracteristic al obiectului manipulat trebuie să fie deplasat după o traiectorie bine precizată. În afara trecerii prin punctele de precizie ale traiectoriei, trebuie corelate și vitezele de deplasare în lungul celor trei axe.

La toate tipurile de comenzi se impune ca mișcarea relativă a elementelor cuplelor cinematice conducătoare să se realizeze după anumite legi de mișcare $q = q(t)$, care se aleg în funcție de sarcina de manipulare figura 171. Pentru o cuplă cinematică conducătoare de rotație coordonata generalizată $q = \theta$, iar pentru una de translație $q = s$.

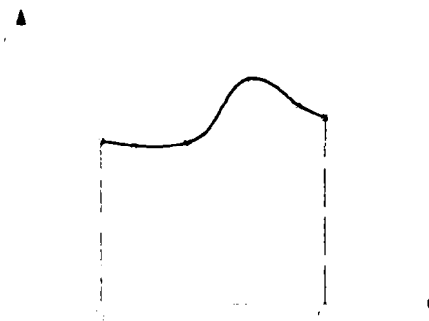


Fig.171 Graficul legii de mișcare

Legea de mișcare se realizează pe baza comenzii emise de sistemul de comandă. Din acest motiv, lege de mișcare poartă numele de *funcție de comandă* [K11].

La comanda de traiectorie continuă, alura graficului funcției de comandă pe un interval de timp $[t_1, t_2]$, corespunde în spațiul cartezian de urmat de către punctul caracteristic în același interval de timp.

În cazul comenzilor secvențiale, punct cu punct, sau multipunct, t_1 respectiv t_2 reprezintă momentele de timp în care punctul caracteristic atinge un punct de precizie P_1 sau P_2 . alura funcției de comandă este stabilită în acest caz de programator, care trebuie să aleagă legea de mișcare pe baza unor cerințe de optimizare.

Frecvent se utilizează ca funcții de comandă cele care descriu între punctele programate legii de mișcare polinomiale:

$$\begin{cases} q = C_n \cdot t^n + C_{n-1} \cdot t^{n-1} + \dots + C_2 \cdot t^2 + C_1 \cdot t^1 + C_0 \\ q = n \cdot C_n \cdot t^{n-1} + (n-1) \cdot C_{n-1} \cdot t^{n-2} + \dots + 3 \cdot C_3 \cdot t^2 + 2 \cdot C_2 \cdot t + C_1 \\ q = n \cdot (n-1) \cdot C_n \cdot t^{n-2} + (n-2) \cdot (n-1) \cdot C_{n-1} \cdot t^{n-3} + \dots + 2 \cdot 3 \cdot C_3 \cdot t + 2 \cdot C_2 \end{cases} \quad (225)$$

Funcția de comandă de ordinul "0", descrisă de q , corespunde legii spațiului generalizat, cea de ordinul "1", descrisă de \dot{q} , corespunde legii vitezei generalizate iar cea de ordinul "2", descrisă de \ddot{q} corespunde legii accelerației generalizate.

Pentru stabilirea funcțiilor de comandă polinomiale trebuie determinați coeficienții C în relațiile (225). În acest scop se aleg niște puncte de precizie în spațiul cuplelor

cinematice q_j . Un punct de precizie Q_0 este traversat de curba $q_j(t)$ în momentul $t = t_0$.

Punctul de precizie $Q_0(q_j)$ din spațiul cuplelor îi corespunde punctul de precizie $P_0(x, y, z)$ pe traiectoria de programat în spațiul cartezian. Relațiile de legătură între coordonatele generalizate q_j și coordonatele carteziene x, y și z ale

celor două tipuri de puncte de precizie se stabilesc din analiza cinematică directă a dispozitivului de ghidare.

Numărul coeficienților care determină legea de mișcare de ordinul "0", când aceasta are forma unui polinom de gradul "n", este $p = n + 1$. determinarea coeficienților necesită deci adoptarea unui număr de "p" condiții. Prin aceste condiții pot fi prescrise coordonatele generalizate ale unor puncte de precizie, cât și restricții de limitare a vitezei și accelerației generalizate în momentele de traversare ale punctelor de precizie. Impunând ca cele "p" condiții să verifice sistemul (6.23), se ajunge la un sistem de p ecuații liniare în C, de unde pot fi determinați coeficienții căutați.

5.10 Determinarea legii de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune, considerându-l ca o axă de robot, pe baza procesului tehnologic de turnare sub presiune

Luând în considerare pozițiile succesive pe care le ocupă pistonul mașinii de turnat sub presiune în timpul procesului de turnare (figura 168) se pot determina trei

Tab.21 Condiții inițiale și la limită pentru punctele de precizie

Punct carac.	Cursă piston	Durata deplasare	Viteza de deplasare	Proces tehnologic	Condiții inițiale și la limită
$P_1 \rightarrow (0-1)$	Z_1	t_I	vp	Umplerea camerei de compresie	$t = 0 \rightarrow q = 0; \dot{q} = 0$ $t = t_I \rightarrow q = z_1; \dot{q} = vp$
$P_2 \rightarrow (1-2)$	Z_2	t_{II}	v_{pI}	Umplere rețea de turnare	$t = t_I \rightarrow q = z_1; \dot{q} = vp$ $t = t_I + t_{II} \rightarrow q = z_1 + z_2; \dot{q} = v_{pI}$
$P_3 \rightarrow (2-3)$	Z_3	t_{III}	v_{pII}	Umplere cavitate formă	$t = t_I + t_{II} \rightarrow q = z_1 + z_2; \dot{q} = v_{pI}$ $t = t_I + t_{II} + t_{III} \rightarrow q = z_1 + z_2 + z_3; \dot{q} = v_{pII}$
$P_4 \rightarrow (3-4)$	Z_4	t_{IV}	v_{pIII}	Îndesare material	$t = t_I + t_{II} + t_{III} \rightarrow q = z_1 + z_2 + z_3; \dot{q} = v_{pII}$ $t = t_I + t_{II} + t_{III} + t_{IV} \rightarrow q = z_1 + z_2 + z_3 + z_4; \dot{q} = v_{pIII}$

puncte de precizie P_1, P_2, P_3 pe care le ocupă pistonul în proces tabelul 21.

Adoptând pentru funcția de comandă de ordinul "0" a unei axe de robot (pistonul mașinii de turnat) un polinom de gradul trei, pentru numărul condițiilor care pot fi impuse rezultă $p = 4$.

Cum traiectoria în spațiul cuplei este delimitat de patru puncte P_1, P_2, P_3, P_4 , care se ating succesiv în momentele $t = t_I, t = t_I+t_{II}, t = t_I+t_{II}+t_{III}, t = t_I+t_{II}+t_{III}+ t_{IV}$, cele patru condiții se definesc prin reunirea a două condiții inițiale cu două condiții finale de forma celor prezentate în tabelul 6.1.

Făcând în ecuațiile (225) $n = 3$ și înlocuind condițiile din tabelul 21 se obține pentru fiecare deplasare a pistonului în timpul procesului de turnare funcția de comandă de ordinul "0":

- pentru faza de umplere cameră de compresie

$$t = 0 \rightarrow q = 0; \dot{q} = 0$$

$$t = t_I \rightarrow q = z_1; \dot{q} = v_p$$

$$q_I(t) = t^3 C_3 + t^2 C_2 + t C_1 + C_0 \tag{226}$$

$$C_0 = 0$$

$$C_1 = 0$$

$$t_I^3 \cdot C_3 + t_I^2 \cdot C_2 = z_1$$

$$3t_I^2 \cdot C_3 + 2t_I \cdot C_2 = v_p$$

- pentru faza de umplere rețea de turnare

$$t = t_I \rightarrow q = z_1; \dot{q} = v_p$$

$$t = t_I + t_{II} \rightarrow q = z_1 + z_2; \dot{q} = v_{pI}$$

$$q_{II}(t) = t^3 C_3 + t^2 C_2 + t C_1 + C_0 \tag{227}$$

$$t_I^3 \cdot C_3 + t_I^2 \cdot C_2 + t_I \cdot C_1 + C_0 = z_1$$

$$3t_I^2 \cdot C_3 + 2t_I \cdot C_2 + C_1 = v_p$$

$$(t_I + t_{II})^3 \cdot C_3 + (t_I + t_{II})^2 \cdot C_2 + (t_I + t_{II}) \cdot C_1 + C_0 = z_1 + z_2$$

$$3 \cdot (t_I + t_{II})^2 \cdot C_3 + 2 \cdot (t_I + t_{II}) \cdot C_2 + C_1 = v_{pII}$$

- pentru faza de umplere cavitate matriță

$$t = tI + tII \rightarrow q = z_1 + z_2; \dot{q} = vpl$$

$$t = tI + tII + tIII \rightarrow q = z_1 + z_2 + z_3; \dot{q} = vpll$$

$$qIII(t) = t^3 C_3 + t^2 C_2 + t C_1 + C_0 \quad (228)$$

$$\begin{cases} (tI+tII)^3 \cdot C_3 + (tI+tII)^2 \cdot C_2 + (tI+tII) \cdot C_1 + C_0 = z_1 + z_2 \\ 3 \cdot (tI+tII)^2 \cdot C_3 + 2 \cdot (tI+tII) \cdot C_2 + C_1 = vpl \\ (tI+tII+tIII)^3 \cdot C_3 + (tI+tII+tIII)^2 \cdot C_2 + (tI+tII+tIII) \cdot C_1 + C_0 = z_1 + z_2 + z_3 \\ 3 \cdot (tI+tII+tIII)^2 \cdot C_3 + 2 \cdot (tI+tII+tIII) \cdot C_2 + C_1 = vpll \end{cases}$$

Funcția de comandă de ordinul "0" pentru întreaga mișcare a pistonului este dată de expresia:

$$q(t) = \begin{cases} qI(t), & \text{pentru } 0 < t \leq tI \\ qII(t), & \text{pentru } tI < t \leq tI + tII \\ qIII(t), & \text{pentru } tI + tII < t \leq tI + tII + tIII \end{cases} \quad (229)$$

Pentru determinarea funcției de comandă dată de relația (229) s-a întocmit un program de calcul utilizând programul *Mathcad 2001 Professional* .

Programul are ca date de intrare :

- diametrul pistonului mașinii de turnat sub presiune;
- lungimea maxima a cursei pistonului mașinii de turnat sub presiune;
- viteza de mișcare a pistonului în prima fază tehnologică;
- volumul de aliaj topit ce intră în camera de compresie în faza de alimentare;
- volumul rețelei de turnare;
- volumul cavității forme de turnare ca sumă a tuturor cavițiilor amprentă la matrițele multicuib;
- aria secțiunii de intrare în rețeaua de turnare;
- aria secțiunii alimentatorului ca sumă a ariilor tuturor alimentatoarelor ce alimentează cavițiile amprentă la matrițele multicuib;

- coeficientul de contracție;
- viteza de deplasare a aliajului lichid în rețeaua matriței;
- viteza de mișcare a aliajului la intrarea în cavitate.

Date de ieșire:

- deplasările pistonului în conformitate cu procesul tehnologic;
- deplasarea pistonului în timpul procesului de umplere matriță;
- timpi corespunzători deplasărilor pistonului în timpul procesului;

timpul de umplere matriță;

- viteza pistonului în faza de umplere rețea de turnare;
- viteza pistonului în faza de umplere matriță;
- graficele de variație $q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)$

Programul rulat pentru diverse piese cu mase diferite este prezentat mai jos.

Program de determinare a legii de miscare a pistonului masinii de turnat sub presiune
Nr. program:1

Date de intrare:

diametrul pistonului masinii de turnat sub presiune

$$d_p := 45 \text{ mm}$$

lungimea maxima a cursei pistonului masinii de turnat sub presiune

$$l_c := 345$$

viteza de miscare a pistonului in prima faza tehnologica

$$v_p := 1.5 \cdot 10^3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

volumul total de aliaj topit ce intra in camera de compresie in faza de alimentare

$$V_{\text{total}} := 102000 \text{ mm}^3$$

volumul retelei de turnare

$$V_{\text{retea}} := 32800 \text{ mm}^3$$

volumul cavitatii formeii de turnare

$$V_{\text{cavitate}} := 51200 \text{ mm}^3$$

aria sectiunii de intrare in reseaua de turnare

$$A_1 := 106.87 \text{ mm}^2$$

aria sectiunii alimentatorului

$$A_2 := 64 \text{ mm}^2$$

coeficientul de contractie

$$k := 0.0534$$

viteza de deplasare a aliajului lichid in reseaua de turnare

$$v_1 := 15 \cdot 10^3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

viteza de miscare a aliajului la intrarea in cavitate

$$v_2 := 25 \cdot 10^3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$z_1 := \left[lc - \frac{(V_{total}) \cdot 4}{\pi \cdot (dp)^2} \right]$$

$$A_p := \frac{\pi \cdot dp^2}{4}$$

$$z_2 := \left(\frac{V_{retea} \cdot 4}{\pi \cdot dp^2} \right)$$

$$A_p = 1.59 \times 10^3$$

$$z_3 := \left(\frac{V_{caavitate} \cdot 4}{\pi \cdot dp^2} \right)$$

$$z_4 := \left(\frac{V_{total} \cdot k \cdot 4}{\pi \cdot dp^2 \cdot 100} \right)$$

grosimea adausului tehnologic

$$z_5 := \left[lc - (z_1 + z_2 + z_3 + z_4) \right]$$

$$tI := \frac{z_1}{v_p}$$

viteza pistonului in faza II

$$v_{pII} := \frac{A_1 \cdot v_1 \cdot 4}{\pi \cdot dp^2}$$

durata deplasarii in faza II

$$tII := \frac{z_2}{v_{pII}}$$

viteza pistonului in faza III

$$v_{pIII} := \frac{A_2 \cdot v_2 \cdot 4}{\pi \cdot dp^2}$$

durata deplasării în faza III

$$t_{III} := \frac{z_3}{v_{pIII}}$$

durata deplasării în faza IV

$$v_{pIV} := 50 \cdot 10^3 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$t_{IV} := \frac{z_4}{v_{pIV}}$$

$$t_{\text{umplere}} := t_I + t_{II} + t_{III} + t_{IV} \quad \text{s}$$

$$q_1 := z_1 + z_2 + z_3 + z_4 \quad \text{mm}$$

$$\Delta I := \begin{pmatrix} t^3 & t^2 \\ 3 \cdot t^2 & 2 \cdot t \end{pmatrix} \quad |\Delta I| = -1.229 \times 10^{-3}$$

$$\Delta IC_3 := \begin{pmatrix} z_1 & t^2 \\ v_p & 2 \cdot t \end{pmatrix} \quad |\Delta IC_3| = 52.591 \quad C_3 := \frac{|\Delta IC_3|}{|\Delta I|}$$

$$C_3 = -4.278 \times 10^4$$

$$\Delta IC_2 := \begin{pmatrix} t^3 & z_1 \\ 3 \cdot t^2 & v_p \end{pmatrix} \quad |\Delta IC_2| = -19.695 \quad C_2 := \frac{|\Delta IC_2|}{|\Delta I|}$$

$$C_2 = 1.602 \times 10^4$$

$$qI(t) := C_3 \cdot t^3 + C_2 \cdot t^2$$

$$vI(t) := C_3 \cdot t^2 \cdot 3 + C_2 \cdot t \cdot 2$$

$$aI(t) := 6 \cdot C_3 \cdot t + 2 \cdot C_2$$

$$\Delta := \begin{bmatrix} tI^3 & tI^2 & tI & 1 \\ 3 \cdot tI^2 & 2 \cdot tI & 1 & 0 \\ (tI + tII)^3 & (tI + tII)^2 & tI + tII & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & 2 \cdot (tI + tII) & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|\Delta| = 1.753 \times 10^{-7}$$

$$\Delta C_3 := \begin{bmatrix} z_1 & tI^2 & tI & 1 \\ vp & 2 \cdot tI & 1 & 0 \\ z_1 + z_2 & (tI + tII)^2 & tI + tII & 1 \\ vpII & 2 \cdot (tI + tII) & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|\Delta C_3| = 0.206$$

$$\Delta C_2 := \begin{bmatrix} tI^3 & z_1 & tI & 1 \\ 3 \cdot tI^2 & vp & 1 & 0 \\ (tI + tII)^3 & z_1 + z_2 & tI + tII & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & vpII & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|\Delta C_2| = -0.124$$

$$\Delta C_1 := \begin{bmatrix} tI^3 & tI^2 & z_1 & 1 \\ 3 \cdot tI^2 & 2 \cdot tI & vp & 0 \\ (tI + tII)^3 & (tI + tII)^2 & z_1 + z_2 & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & 2 \cdot (tI + tII) & vpII & 0 \end{bmatrix}$$

$$|\Delta C_1| = 0.025$$

$$\Delta C_0 := \begin{bmatrix} tI^3 & tI^2 & tI & z_1 \\ 3 \cdot tI^2 & 2 \cdot tI & 1 & vp \\ (tI + tII)^3 & (tI + tII)^2 & tI + tII & z_1 + z_2 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & 2 \cdot (tI + tII) & 1 & vpII \end{bmatrix}$$

$$|\Delta C_0| = -1.648 \times 10^{-3}$$

$$i:=0..3$$

$$C_i := \frac{|\Delta C_i|}{|\Delta|}$$

$$q_2(t) := C_3 \cdot t^3 + C_2 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_0$$

$$v_2(t) := 3 \cdot C_3 \cdot t^2 + 2 \cdot C_2 \cdot t + C_1$$

$$a_2(t) := 6 \cdot C_3 \cdot t + 2 \cdot C_2$$

$$\Delta_3 := \begin{bmatrix} (tI + tII)^3 & (tI + tII)^2 & tI + tII & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & 2 \cdot (tI + tII) & 1 & 0 \\ (tI + tII + tIII)^3 & (tI + tII + tIII)^2 & tI + tII + tIII & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII + tIII)^2 & 2 \cdot (tI + tII + tIII) & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad |\Delta_3| = 1.049 \times 10^{-6}$$

$$\Delta_{3C3} := \begin{bmatrix} z_1 + z_2 & (tI + tII)^2 & tI + tII & 1 \\ vpII & 2 \cdot (tI + tII) & 1 & 0 \\ z_1 + z_2 + z_3 & (tI + tII + tIII)^2 & tI + tII + tIII & 1 \\ vpIII & 2 \cdot (tI + tII + tIII) & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad |\Delta_{3C3}| = 1.964 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{3C2} := \begin{bmatrix} (tI + tII)^3 & z_1 + z_2 & tI + tII & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & vpII & 1 & 0 \\ (tI + tII + tIII)^3 & z_1 + z_2 + z_3 & tI + tII + tIII & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII + tIII)^2 & vpIII & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad |\Delta_{3C2}| = -1.349 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{3C1} := \begin{bmatrix} (tI + tII)^3 & (tI + tII)^2 & z_1 + z_2 & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & 2 \cdot (tI + tII) & vpII & 0 \\ (tI + tII + tIII)^3 & (tI + tII + tIII)^2 & z_1 + z_2 + z_3 & 1 \\ 3 \cdot (tI + tII + tIII)^2 & 2 \cdot (tI + tII + tIII) & vpIII & 0 \end{bmatrix} \quad |\Delta_{3C1}| = 1.363 \times 10^{-3}$$

$$\Delta 3C0 := \begin{bmatrix} (tI + tII)^3 & (tI + tII)^2 & tI + tII & z_1 + z_2 \\ 3 \cdot (tI + tII)^2 & 2 \cdot (tI + tII) & 1 & vpII \\ (tI + tII + tIII)^3 & (tI + tII + tIII)^2 & tI + tII + tIII & z_1 + z_2 + z_3 \\ 3 \cdot (tI + tII + tIII)^2 & 2 \cdot (tI + tII + tIII) & 1 & vpIII \end{bmatrix}$$

$$|\Delta 3C0| = 7.359 \times 10^{-5}$$

$$C_0 := \frac{|\Delta 3C0|}{|\Delta 3|}$$

$$C_1 := \frac{|\Delta 3C1|}{|\Delta 3|}$$

$$C_2 := \frac{|\Delta 3C2|}{|\Delta 3|}$$

$$C_3 := \frac{|\Delta 3C3|}{|\Delta 3|}$$

$$C_0 = 70.184$$

$$C_1 = 1.3 \times 10^3$$

$$C_2 = -1.287 \times 10^3$$

$$C_3 = 1.873 \times 10^3$$

$$q3(t) := C_3 \cdot t^3 + C_2 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_0$$

$$v3(t) := 3 \cdot C_3 \cdot t^2 + 2 \cdot C_2 \cdot t + C_1$$

$$a3(t) := 6 \cdot C_3 \cdot t + 2 \cdot C_2$$

Date de iesire:

deplasările pistonului conform procesului tehnologic de umplere matrita

$$z_1 = 280.866 \quad \text{mm}$$

$$z_2 = 20.623 \quad \text{mm}$$

$$z_3 = 32.193 \quad \text{mm}$$

$$z_4 = 0.034 \quad \text{mm}$$

$$z_5 = 11.283 \quad \text{mm}$$

deplasarea pistonului in treapta de proces "umplere matrita"

$$q_1 = 333.717 \quad \text{mm}$$

timi corespunzatori deplasarii pistonului conform procesului de umplere matrita

$$tI = 0.187 \quad \text{s}$$

$$tII = 0.02 \quad \text{s}$$

$$tIII = 0.032 \quad \text{s}$$

$$tIV = 6.849 \times 10^{-7} \quad \text{s}$$

timpul de umplere matrita

$$t_{\text{umplere}} = 0.24 \quad \text{s}$$

vitezele pistonului conform procesului de umplere matrita

viteza pistonului in faza de umplere retea

$$v_{pII} = 1.008 \times 10^3 \quad \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

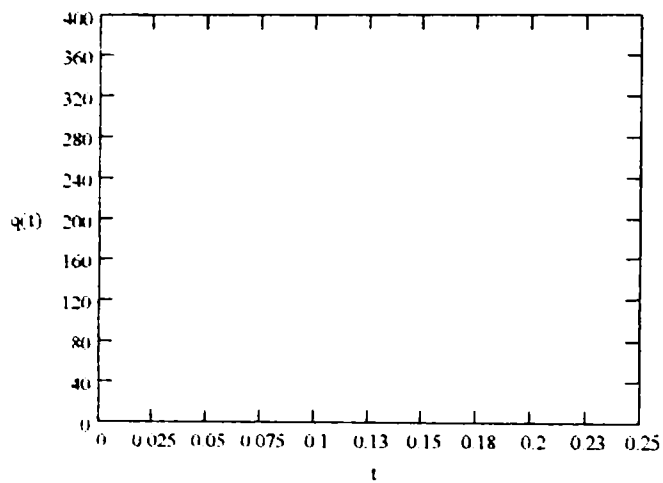
viteza pistonului in faza de umplere cavitate forma

$$v_{pIII} = 1.006 \times 10^3 \quad \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Legea de mișcare a pistonului

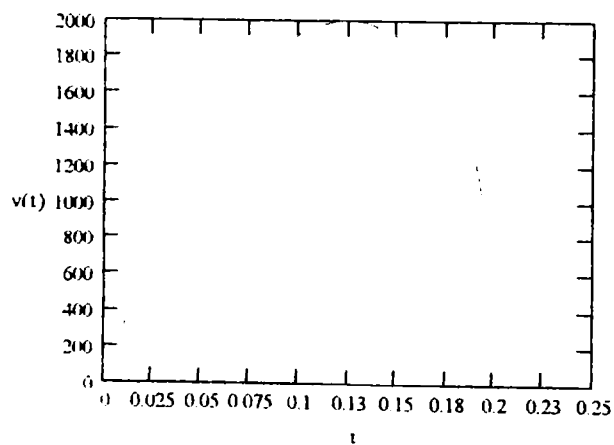
$$c := 0 \quad d := t_1 + t_{II} + t_{III} \quad \delta := 0.005 \quad t := c..c + \delta..d$$

$$q(t) := \begin{cases} q_1(t) & \text{if } 0 < t \leq t_1 \\ q_2(t) & \text{if } t_1 < t \leq t_1 + t_{II} \\ q_3(t) & \text{if } t_1 + t_{II} < t \leq t_1 + t_{II} + t_{III} \end{cases}$$



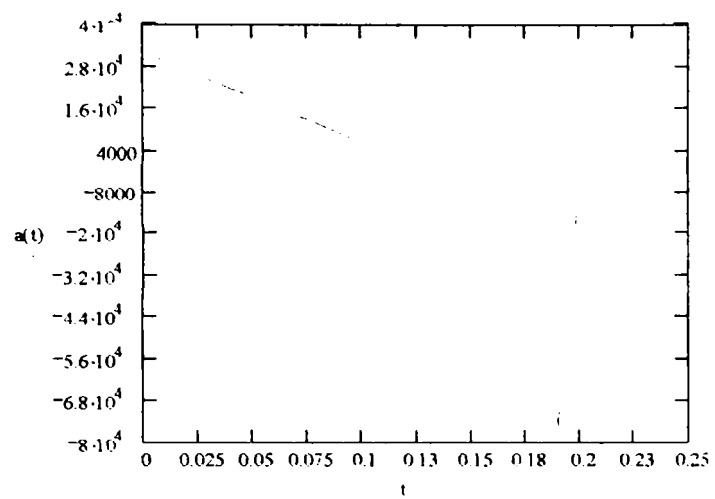
variația vitezei pistonului în treapta de proces umplere matrită

$$v(t) = \begin{cases} v_1(t) & \text{if } 0 < t \leq t_1 \\ v_2(t) & \text{if } t_1 < t \leq t_1 + t_{II} \\ v_3(t) & \text{if } t_1 + t_{II} < t \leq t_1 + t_{II} + t_{III} \end{cases}$$



variația accelerației pistonului în treapta de proces umplere matrită

$$a(t) := \begin{cases} a_1(t) & \text{if } 0 < t \leq t_I \\ a_2(t) & \text{if } t_I < t \leq t_I + t_{II} \\ a_3(t) & \text{if } t_I + t_{II} < t \leq t_I + t_{II} + t_{III} \end{cases}$$



Sisteme de acționare a roboților industriali

6.1 Introducere

Prin acționare se înțelege un ansamblu de funcții tehnice prin care se realizează transformarea energiei nemecanice într-una mecanică, în vederea punerii în mișcare relativă a unor elemente. Sursele de energie nemecanică necesare unui sistem de acționare pot fi: electrică, termică, hidraulică, diverse.

Transformare energiei nemecanice în energie mecanică se realizează prin intermediul unor echipamente specifice (motoare electrice, electromagneți, turbine, pompe, compresoare de aer, motoare hidraulice, motoare pneumatice) și se transmite direct la elementele de execuție, sau indirect, prin intermediul unor transmisii mecanice.

În figura 172.a s-a conceput o schemă bloc generală a unui sistem, de la energia primară la energia mecanică necesară punerii în mișcare a diverselor mecanisme.

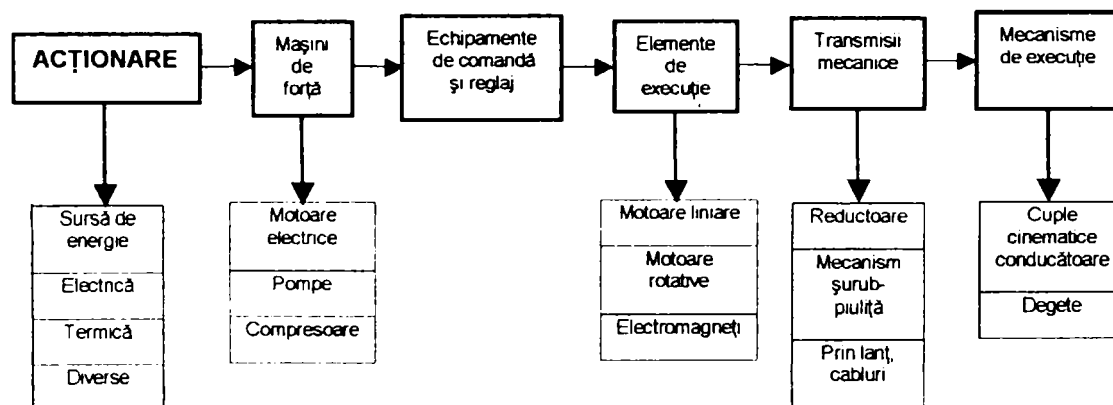


Fig.172.a. Shema bloc a unui sistem de acționare a unui robot

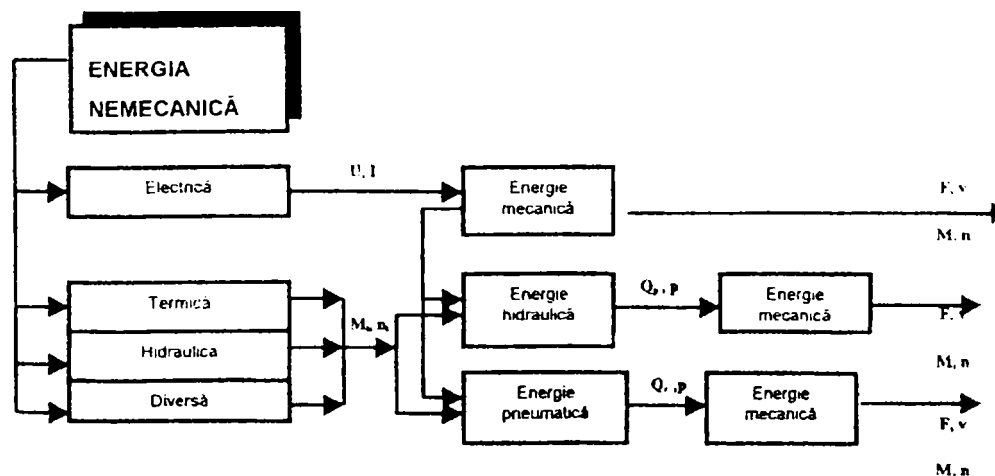


Fig.172.b. Fluxul transformărilor energetice

Locul sistemului de acționare în structura unui robot rezultă din schema prezentată în figura 173, precum și fluxul informațional între elementele componente.

Sistemul de acționare al unui robot cuprinde totalitatea surselor energetice mecanice ale robotului precum și elementele de control ale acestora.

În acest sens prin sistem de acționare al unui robot se va înțelege ansamblul motoarelor și convertoarelor prin care se obține energia mecanică necesară mișcării cuplelor cinematice conducătoare, precum și dispozitivele suplimentare ce controlează acest transfer energetic.

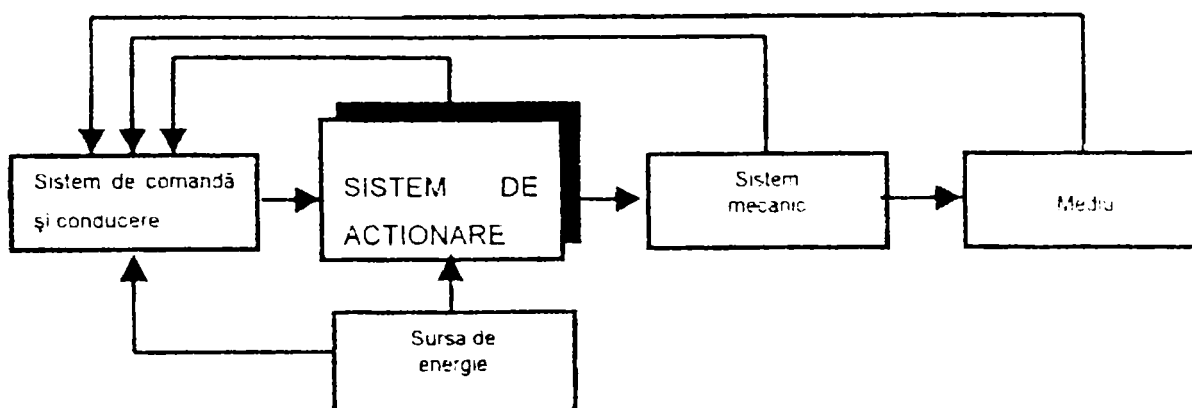


Fig.173. Schema bloc a unui robot industrial

Din structura generală a unui robot industrial, prezentată prin schema bloc din figura 173, rezultă că pentru realizarea gradelor de mobilitate, acesta este format dintr-o serie de axe cinematice.

Prin " axă cinematică " a unui robot industrial se înțelege un ansamblu compact constituit din structură mecanică, motor de acționare, transmisii, echipamente de comandă și reglaj, senzori și traductoare pentru diferite mărimi, cuprinse într-un circuit de reglaj având drept scop asigurarea unor mărimi programate pentru deplasări, poziții, viteze, forțe și momente.

În construcția roboților și manipuletoarelor se întâlnesc următoarele tipuri de acționări:

- Acționare electrică;
- Acționare hidraulică;
- Acționare pneumatică;
- Acționare mixtă (electro-hidraulică; electro-pneumatică; pneumo-hidraulică).

6.2 Sisteme de acționare electrică a roboților industriali

6.2.1 Introducere

Acționarea electrică a R.I. se aplică, în ultima perioadă, pe scară din ce în ce mai largă ca umare a unor avantaje ce au apărut în urma punerii la punct a unor noi soluții de comandă, precum și a dezvoltării unor noi familii și tipuri de motoare electrice precum și posibilitățile de comandă a acestora. Acționarea electrică se aplică în cazul roboților mici și mijlocii, acolo unde puterea necesară acționării nu depășește ordinul 3-5 kW, caz în care gabaritul și greutatea motoarelor se încadrează în dezideratele de formă și de suprafețe ale structurii mecanice.

De asemenea, acționarea de tip electric este posibilă acolo unde nu se pun condiții speciale de mediu (medii explozive, medii umede, etc.)

În acționarea electrică a R.I. se regăsesc majoritatea soluțiilor aplicate și perfecționate în decursul timpului și în celelalte domenii ale tehnicii, cu particularitățile ce decurg din necesitatea unei game largi de reglaj a turațiilor, precum și de producere a unor cupluri motoare cât mai ridicate de către motoare cât mai mici.

Dacă primul deziderat ține în primul rând de perfecționarea soluțiilor de comandă, cel de-al doilea este legat de tipul și performanțele electromagnetice ale motorului și de calitatea materialelor utilizate în construcția sa.

Abordarea corectă a problemelor ridicate de tehnica modernă a acționărilor electrice în vederea proiectării și exploatării lor optimale se face numai considerând acționarea ca un sistem, adică un ansamblu de elemente fizice interconectate, prin care se realizează conversia electromagnetică a energiei cu același scop funcțional.

Astfel rezultă cele trei componente de bază ale sistemului de acționare electrică:

- mașina electrică de acționare (motoare);
- subsistemul de transmisie al mișcării de la mașina electrică la elementul de lucru;
- elementul de lucru.

Pe lângă aceste componente de bază, sistemul de acționare electrică mai include și echipamente de comandă, reglare, protecție și modificare a parametrilor energiei de alimentare.

Structura sistemelor de acționare electrică este arătată principal în schemele bloc din figura 174.a, b, c.

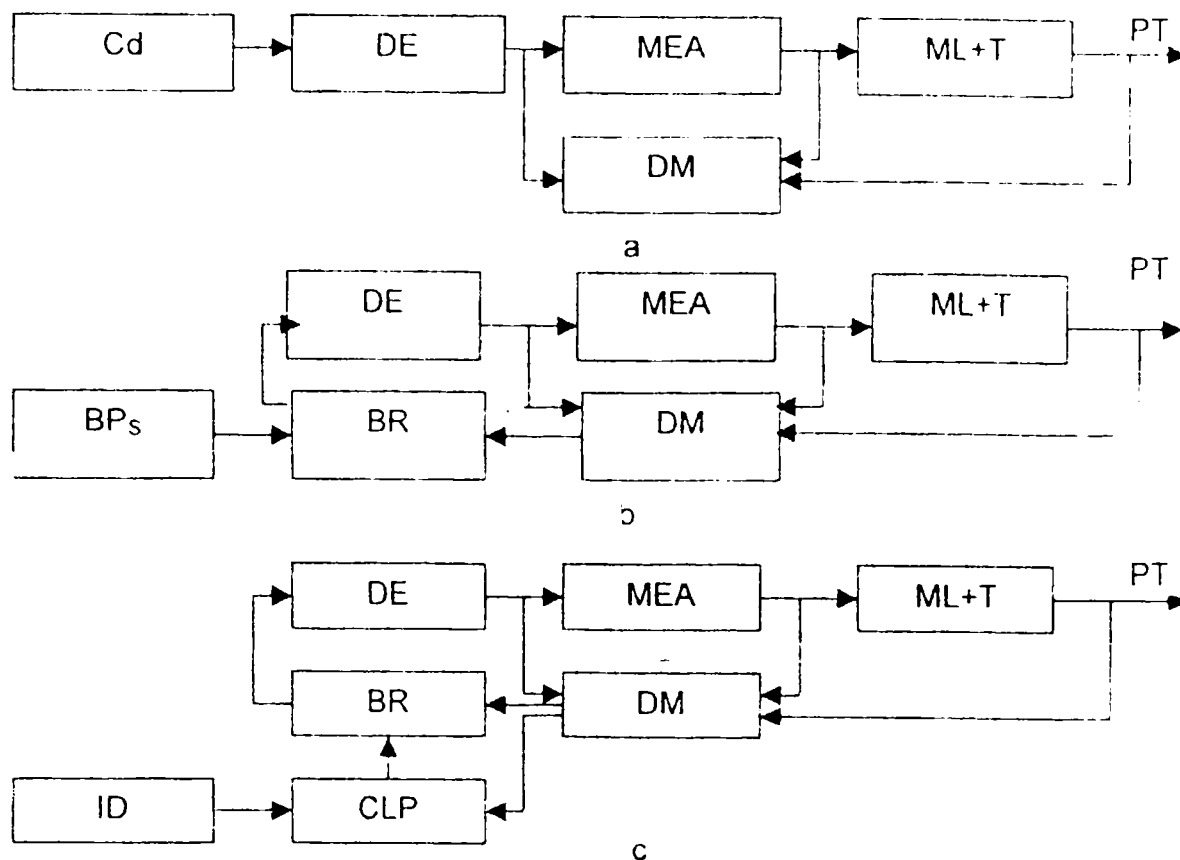


Fig.174 Scheme bloc ale sistemelor de acționare electrică ale R.I.

În figura 174 .a se prezintă un sistem de acționare cu comandă în circuit deschis; b- sistem de acționare cu conducere automată asigurată prin blocul de reglare BR și blocul de emiterie a valorii prescrise BPs; c- sistem de acționare complet automatizat cu conducere prin calculator de proces CLP;

Părți componente:

- DE – dispozitiv execuție; MEA – motor electric de acționare; ML – elementul de lucru; T – transmisie mecanică; DM – dispozitiv de măsurare, care înglobează aparatele de măsură și traductoarele; BR – bloc de reglare; BPs – bloc de prescriere; CPL – calculator de proces; ID – introducerea datelor; PT – proces tehnologic.

Acționarea electrică a R.I., funcție de tipul motorului electric de acționare (M.E.A.) se realizează conform schemei bloc din figura 175.

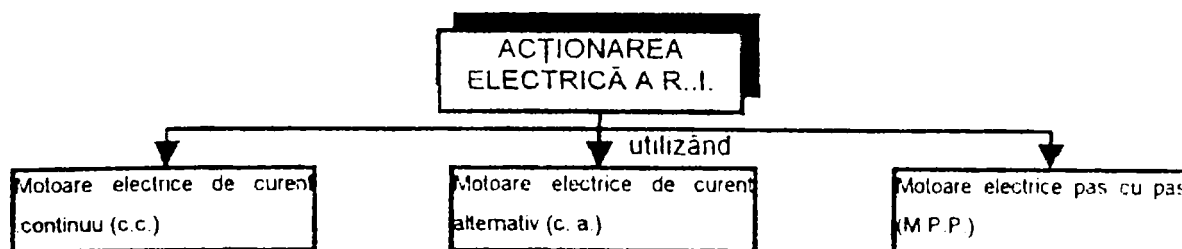


Fig. 175 Tipuri de acționări electrice ale R.I.

6.2.2. Acționarea electrică cu motoare de curent continuu (c.c.)

Acționarea cu motoare de curent continuu constituie principala ramură pe care s-au orientat soluțiile de acționare electrică a roboților industriali.

În cazul motoarelor de curent continuu (c.c.) , derivație, caracteristica de tip liniar face ca scăderea turației să fie proporțională cu variația cuplului rezistent.

Caracteristica mecanică a motorului de curent continuu serie face parte din grupa caracteristicilor "moi", caz avantajos când motorul antrenează lanțuri cinematice în care apar șocuri de sarcină. Astfel, în cazul creșterii bruște a cuplului rezistent, viteza scade eliberându-se o mare cantitate de energie cinetică, șocul fiind suportat de motor, scutind rețeaua electrică de suprasolicitări.

Variația turației se face preponderent prin variația tensiunii de alimentare, caracteristicile mecanice obținute fiind o familie de hiperbole echilaterale.

Motorul de curent continuu prezintă două avantaje majore pentru acționările electromagnetice, și anume permite modificarea turației în limite largi, în condițiile menținerii cuplului la o valoare ridicată și suficient de constantă, iar modificarea turației se poate face relativ simplu, cu variația tensiunii de alimentare.

6.2.3 Acționarea cu motoare electrice de curent alternativ (c.a.)

Acționarea cu motoare electrice de curent alternativ în comandă cu orientare după câmp este o tendință modernă, ce câștigă tot mai mult teren în domeniul acționării roboților industriali, datorită unor avantaje cum sunt:

- posibilitatea reglării precise a poziției rotorului și prin aceasta, de reglare precisă a poziției elementului mobil acționat;
- performanțe de reglare a vitezei la fel de bune ca și în cazul motoarelor de curent continuu, indicele energetic al acționării fiind mai bun;
- robustețea mai bună a motoarelor și preț de cost mai redus al întregului sistem de comandă-acționare.

Extinderea și perfecționarea acestor noi soluții de acționare, a fost posibilă după ce electronica de putere a cunoscut o primă dezvoltare, în anii 70, iar apoi datorită introducerii pe scară largă a microprocesoarelor.

6.2.4. Acționarea cu motoare electrice pas cu pas.

Utilizarea motoarelor electrice pas cu pas în acționarea R.I., conferă în principiu, următoarele avantaje:

- asigură univocitatea conversiei numărului de impulsuri-deplasare și pot fi utilizate în circuit deschis;

- gamă largă de frecvențe de comandă;
- precizie de poziționare și rezoluție mare;
- permit porniri, opriri, reversări fără pierderi de pași;
- memorează poziția;
- sînt compatibile cu comanda numerică.

Dezavantajele motoarelor electrice pas cu pas sunt:

- unghi de pas, deci increment de rotație, de valoarea fixă pentru un motor dat;
- viteză de rotație relativ scăzută;
- " pierdere de pași " în anumite condiții;
- puterea dezvoltată la arbore de valoarea redusă ;
- randament energetic scăzut;
- necesită o schemă de comandă complexă.

Cel mai mare dezavantaj al motoarelor electrice pas cu pas este scăderea cuplului motor odată cu creșterea frecvenței și de aici restrângerea domeniului de frecvență pe care poate fi exploatat motorul. Această scădere a cuplului motor se datorează creșterii impedanței înfășurărilor statorice cu frecvența și deci scăderea în consecință a valorii curentului absorbit.

Se constată că după o perioadă de ascensiune, utilizarea motoarelor electrice pas cu pas în acționarea R.I. a scăzut în ultimul timp.

Pentru utilizarea motoarelor electrice pas cu pas în acționarea R.I. se consideră necesară evidențierea câtorva aspecte legate de particularitățile lanțurilor cinematice cu acționare și comandă numerică (NC).

De aici rezultă și cele două principii de funcționare: în buclă deschisă când poziția elementului mobil acționat este anticipată prin cunoașterea precisă a funcției " semnal de intrare ", introducând anumite limitări privind valorile admise ale accelerației și frecvenței, respectiv în buclă închisă (simplă sau dublă) când funcția " semnal de intrare " este corelată în performanță cu poziția și viteza reală a elementului acționat.

Pentru aplicații în acționarea R.I. unde se cer viteze de deplasare ridicate, se impun unele măsuri și soluții de îmbunătățirea a formei caracteristici cuplu-frecvență, lărgind cât mai mult domeniul de frecvență pe care poate fi exploatat un asemenea motor.

Îmbunătățirea caracteristicii de cuplu a unui motor pas cu pas, este una din problemele de care depinde posibilitatea aplicării lui în acționarea roboților industriali.

Ca și în cazul altor tipuri de motoare electrice, și în cazul motoarelor pas cu pas, valoarea cuplului motor depinde de curentul total absorbit, și aceasta la rândul lui de numărul fazelor active în conducție simultană.

6.3 Sisteme de acționare pneumatică a roboților industriali

6.3.1 Introducere

Acționarea pneumatică a roboților industriali a fost una din cele mai utilizate în faza de început a roboticii, peste 45%. Acest lucru a fost posibil datorită unor avantaje pe care le prezintă acest sistem de acționare în comparație cu alte sisteme și anume:

- existența sursei de aer comprimat în majoritatea întreprinderilor;
- simplitatea schemelor de comandă reglaj;
- posibilitatea supraîncărcării motoarelor de acționare fără pericol de avarii;
- posibilitatea utilizării acționării în medii umede, explozive, radiate, în câmpuri magnetice, temperaturi ridicate, fără pericol de accidente;
- motoarele pneumatice de acționare au gabarite mult mai reduse de (8...10) ori, față de motoarele electrice de aceeași putere;
- posibilitatea de a regla în limite largi viteza și forța, sau turația și cuplul motorului pneumatic;
- echipamentele instalației de acționare sunt tipizate sau standardizate, reducând cheltuielile de proiectare, întreținere și reparații;
- în automatizare elementele pneumatice și în special cele fluidice fără piese mobile concurează cu succes pe cale electronică;
- obținerea unor viteze mari de lucru 300-1000 m/min, motiv pentru care acționarea se recomandă în cazul roboților rapizi.

Acționarea pneumatică reprezintă și unele dezavantaje cum ar fi:

- dezvoltă forțe / momente mai reduse;
- datorită vitezelor mari de lucru și a compresibilității aerului se necesită dispozitive suplimentare de oprire în poziții intermediare sau de capăt de cursă, ceea ce scumpește soluția; această problemă este deosebit de importantă în cazul acționării roboților, deoarece de modul ei de rezolvare depinde precizia de poziționare a robotului;

- destinderea bruscă a aerului comprimat în motoarele pneumatice este însoțită de scăderea temperaturii, ceea ce provoacă condensarea și depunerea apei pe pereți, favorizând coroziunea elementelor metalice;

- pierderile de presiune prin conducte largi, cu multe coturi și schimbări de secțiune reduc randamentul instalației.

Cu toate avantajele amintite ale acționărilor pneumatice, datorită dezavantajelor precizate anterior și mai ales datorită progreselor care s-au realizat în domeniul electronicii, cu pondere de circa 4%, rămânând foarte răspândită însă pentru acționarea dispozitivului de prehensiune, cu pondere de circa 70-80.

Acționarea pneumatică asigură energia motoare, echivalentă energiei de antrenare necesare, prin intermediul caracteristicilor aerului comprimat: presiune și debit.

Trecând în revistă principalele soluții utilizate la acționarea pneumatică a roboților industriali, se pot distinge următoarele subgrupe:

a) acționarea pneumatică secvențială; utilizează ca elemente de execuție motoare pneumatice liniare cu piston, sau cu membrană, cu simplă acțiune, sau dublă acțiune sau motoare rotative. Oprirea motoarelor la o anumită poziție, deci determinarea mărimii curselor de lucru se poate face cu ajutorul unor tamponi fixe sau reglabile, permanente sau selectabile din program. Oprirea elementului mobil în poziția finală comandată este obținută cu precizie suficient de bună (0.01 mm) prin menținerea presiunii de alimentare a elementului motor.

b) Acționarea pneumatică asistată hidraulică; este o acționare hibridă de dată mai recentă și a fost dezvoltată tocmai cu aplicabilitate în domeniul roboților industriali, aducând o serie de avantaje față de acționarea pneumatică pură, dintre care se menționează.

- controlul mai eficace al vitezei de deplasare a elementului mobil, în condițiile unei stabilități mai bune a acestuia;

- precizie de poziționare mai bună și rigiditate ridicată a sistemului de acționare, datorită agentului hidraulic.

Ca dezavantaje se pot aminti: randamentul mai scăzut , datorat pierderilor de putere produse pentru circulația agentului hidraulic și gabaritul mai mare al sistemului.

c) Acționarea pneumatică de precizie; pentru eliminarea unor dezavantaje ale acționării pneumatice pure; s-au dezvoltat o serie de soluții în cadrul cărora creșterea preciziei de poziționare se obține prin diferite metode incrementale.

6.4 Sistemul de acționare hidraulică a roboților industriali

6.4.1 Introducere

Ponderea acționării hidraulice a roboților industriali de la perioada de început până în anii 1985, a ocupat primul loc (circa 53%), ceea ce se explică prin avantajele acestui tip de acționare, dar și prin succesele obținute de unele firme din domeniu ca: UNIMATE, VERSATRON, CINCINNATI-MILACRON, care au fabricat roboți renumiți în întreaga lume și care prin performanțele lor foarte bune au constituit adevărate puncte de referință în domeniu.

Chiar dacă în prezent balanța preferințelor în ce privesc acționările roboților înclină foarte mult în favoarea acționărilor de tip electric, acționarea hidraulică, prin avantajele sale va rămâne de neînlocuit în anumite domenii.

Printre principalele avantaje ale acționării hidraulice se enumeră:

- agent de lucru – uleiul hidraulic la presiuni mari, până la 200 bari, dezvoltă forțe respectiv momente ridicate la gabarite mici ale motoarelor hidraulice, fiind un indice energetic cel mai bun;

- se pot construi sisteme de acționare simple și puternice pentru roboții industriali mijlocii și grei destinați manipulării sarcinilor grele în sectoarele calde, (turnătorii, forjă, stivuire, minerit etc.)

- compresibilitatea redusă a agentului hidraulic oferă rigiditatea necesară sistemului de acționare, iar mărimea curselor poate fi determinată și prin defazarea volumului de ulei;

- uzura elementelor în mișcare este redusă, deoarece agentul hidraulic este bun lubrifiant, ceea ce contribuie la îmbunătățirea indicelui de fiabilitate;

- acționările hidraulice pot fi utilizate în medii umede, iradiate, cu câmpuri magnetice de mare intensitate fără pericol de accidente;

- se asigură posibilitatea obținerii unor viteze variabile a elementului de execuție, opriri în puncte fixe cu precizie ridicată;

- dezvoltările tehnologice din domeniul spațial și militar au pus la dispoziție tehnici, principii și aparate noi de comandă și de servocomandă de tip servovalvă și distribuitoare proporționale, acestea constituind elemente cheie în domeniul acționărilor hidraulice de precizie.

Acționările hidraulice prezintă însă și o serie de dezavantaje cum ar fi:

- randamentul global mai scăzut decât în cazul acționărilor electrice;
- necesitatea unor instalații speciale de pregătire a agentului hidraulic, ceea ce mărește complexitatea și ridică costul acționării;
- se necesită etanșări pretențioase la presiunile ridicate, personal bine calificat pentru întreținere și reparații;
- la temperaturi ridicate uleiul hidraulic își modifică vâscozitatea, respectiv parametrii de funcționare, sistemul de acționare necesitând instalații de răcire.

Cu toate avantajele amintite acționarea hidraulică a roboților industriali, datorită motivelor enumerate mai sus au pierdut teren ponderea ei răducându-se la circa 6% din numărul roboților care se produc în prezent. Se poate afirma că actuala rămânere în urmă a acționării hidraulice a roboților, față de acționarea electrică se datorează, pe de o parte dezvoltării unor electromotoare cu calități dinamice de nivel înalt și îmbunătățirii comenzilor electronice, pe de altă parte pierderilor de presiune în servodistribuitoare, și bilanțul energetic nefavorabil. Aceste neajunsuri ale hidraulicii pot fi compensate, atunci când nu sunt impuse cerințe prea mari privitor la dinamica acționării-prin utilizarea servopompelor (servomotoarelor) care au servodistribuitorul situat în circuitul de comandă, în care nivelul energetic este mult mai scăzut.

În acționarea hidraulică a roboților industriali se întâlnesc trei tipuri principale:

- a) acționarea hidraulică secvențială;
- b) acționarea electro-hidraulică servocomandată analogic;
- c) acționarea electr-hidraulică servocomandată digital.

6.4.2 Acționarea hidraulică secvențială

Acționările hidraulice secvențiale sunt sisteme cu circuit deschis la care fluxul energetic informațional se transmite unidirecțional, iar poziția de oprire a elementelor de execuție se obține fie cu ajutorul opritorilor rigizi, reglabili sau ficși, fie cu limitatori de cursă.

Pentru comanda mișcării elementelor de execuție se utilizează elemente de distribuție clasice de tip " totul sau nimic ", comandate de regulă hidraulic sau electromagnetic și mai rar mecanic. Pentru obținerea diferitelor viteze de deplasare se utilizează o serie de regulatoare de debit.

În tabelul 22 se prezintă câteva scheme uzuale utilizate în practica acționării hidraulice a roboților secvențiali pentru o unitate de translație sau rotație.

În figura 176 se reprezintă schema acționării secvențiale în cazul unui robot cu trei grade de mobilitate în coordonate carteziene.

Distribuția agentului hidraulic spre motoare se realizează prin distribuitoare de tip 4/3, patru căi și trei poziții, respectiv 4/2 patru căi și două poziții pentru efectorul final. La motoarele MHL se pot controla vitezele în ambele sensuri prin drosele de cale Drc1 și Drc2.

Stabilirea mărimii curselor de mișcare a cuplelor cinematice conducătoare se poate face fie mecanic prin tamponare rigidă sau electromecanic cu ajutorul unor microlimitatoare ale căror semnale determină schimbarea stării distribuitorilor. Dacă fiecare mișcare este asistată prin intermediul unui traductor de poziție sau de deplasare și se închid bucle de măsurare pe fiecare grad de mobilitate prin intermediul calculatorului, atunci schemele hidraulice secvențiale pot sta la baza acționării roboților evoluți, fără însă a fi posibilă generarea de traiectorie.

Mișcarea oricărui motor (oricărei cuple cinematice) poate fi oprită în orice punct al traiectoriei sale, dacă echipamentul de programare ce culege informațiile de pe bucla de măsurare a deplasării comandă schimbarea stării distribuitorilor în cauză, atunci când cursa reală efectiv realizată are valoarea celei programate.

6.4.3 Sisteme de acționare electro-hidraulice

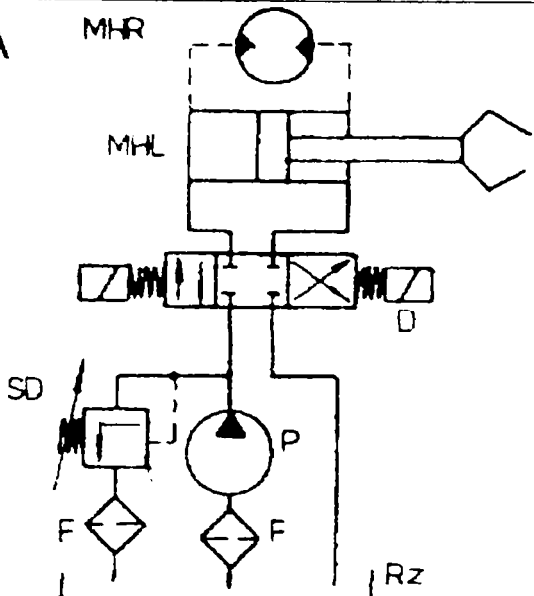
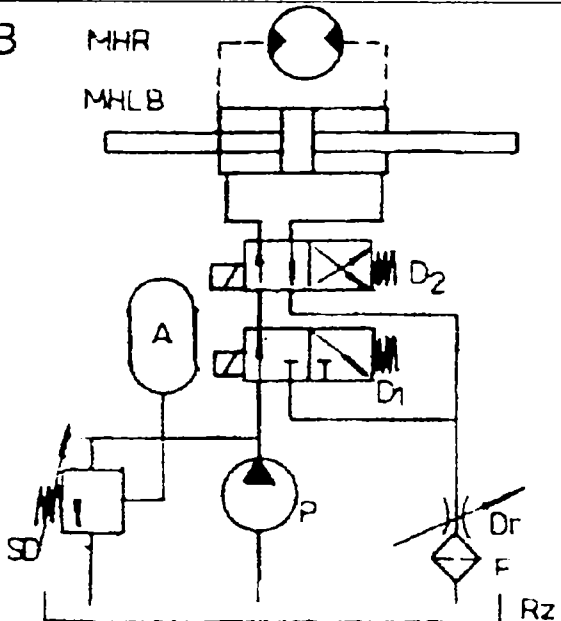
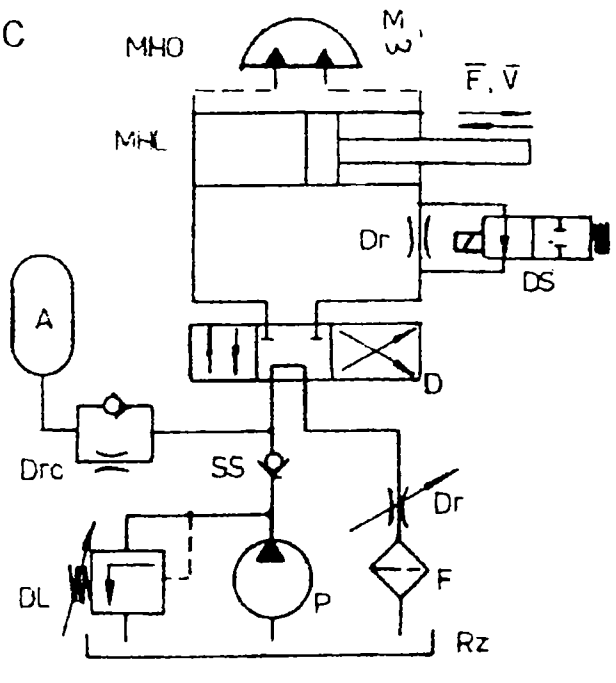
6.4.3.1 Introducere

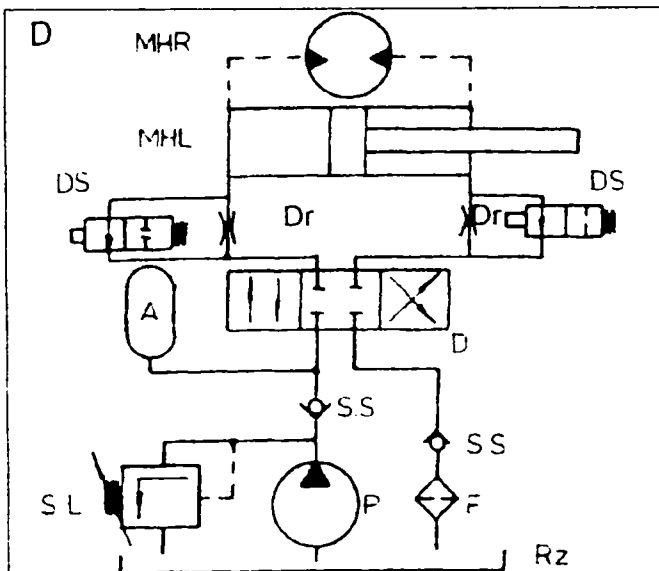
Sistemele de acționare electro-hidraulice întrunesc avantajele acționărilor electrice și hidraulice, eliminând o serie de dezavantaje ale acestor acționări. Sistemele electrohidraulice asociază calitățile deosebite ale sistemelor electrice și electronice în privința comenzilor automate cu avantajele remarcabile ale sistemelor hidraulice, sub aspectul transmiterii energiilor mari. Asocierea a condus la realizarea unor sisteme electro-hidraulice de urmărire automată și în general de reglare automată, cu performanțe superioare.

Extinderea în ultima perioadă a sistemelor de acționare și comandă (conducere) electro-hidraulice în ultima perioadă o reprezintă remarcabilele succese obținute în realizarea servosistemelor de tip servovalve electrohidraulice, elemente complexe de interfață, corespunzând pe deplin pentru sistemele analogice de comandă, precum și aparatura proporțională, care și-a găsit o largă aplicație în comanda și acționarea (conducerea) roboților industriali.

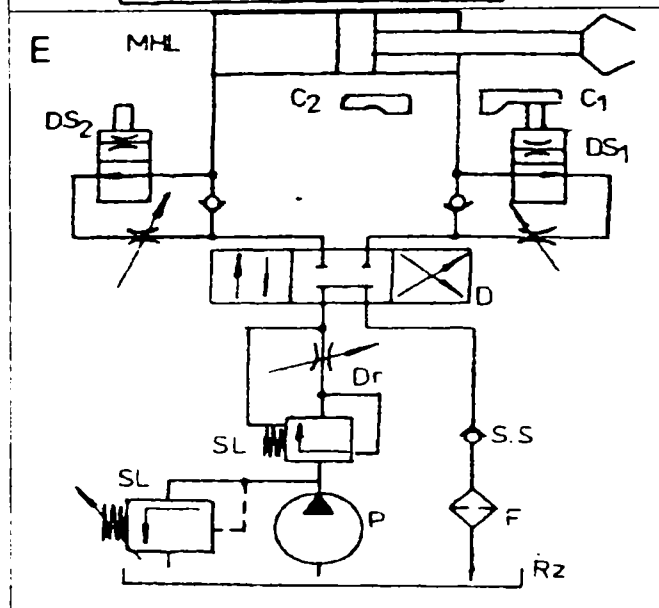
Echipamentele de comandă și reglare realizează la ieșire un debit proporțional cu mărimea semnalului electric de intrare, prin droselizare.

Tabelul 22. Scheme hidraulice de acționare a R.I.

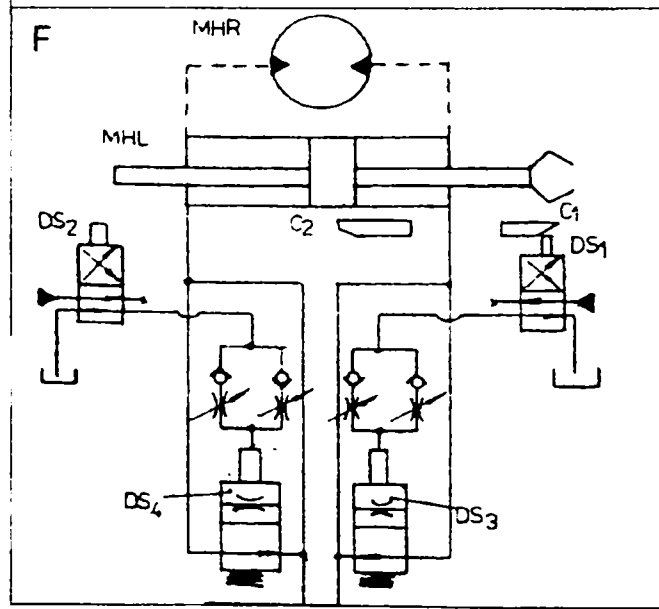
Schema de principiu	Părți componente principale; funcții
<p>A</p> 	<p>P- pompă; F filtre; SD- supapă de descărcare; D- distribuitor 4/3, MHL- motor hidraulic liniar, MHR – motor hidraulic rotativ.</p> <p>Comanda se face prin distribuitorul D, neavând posibilitatea de reglare a vitezelor de deplasare a motorului.</p>
<p>B</p> 	<p>D1- distribuitor 3/2, D2 – distribuitor, 4/2Dr- drosel reglabil, A-acumulator. Nu există posibilitate de reglare a vitezelor de deplasare a motorului.</p>
<p>C</p> 	<p>ss-supapă de sens, Drc – drosel de cale, DS- distribuitor 2/2.</p> <p>Schema asigură două trepte de viteză pentru un singur sens de deplasare prin distribuitorul DS și droselul Dr.</p>



Se asigură două trepte de viteză pentru ambele sensuri prin distribuitorile DS și droscele Dr, MHL- motor hidraulic liniar, MHR- motor hidraulic rotativ



Se asigură două trepte de viteză pentru ambele sensuri prin distribuitorile DS1 și DS2 controlate de canal C1 și C2



Se asigură pornirea și oprirea în două trepte de viteză reglabile fiecare, trecerea fiind asi urată lent rin introducerea unor droscele ce reglează timpul de comutare a droslelor de frânare

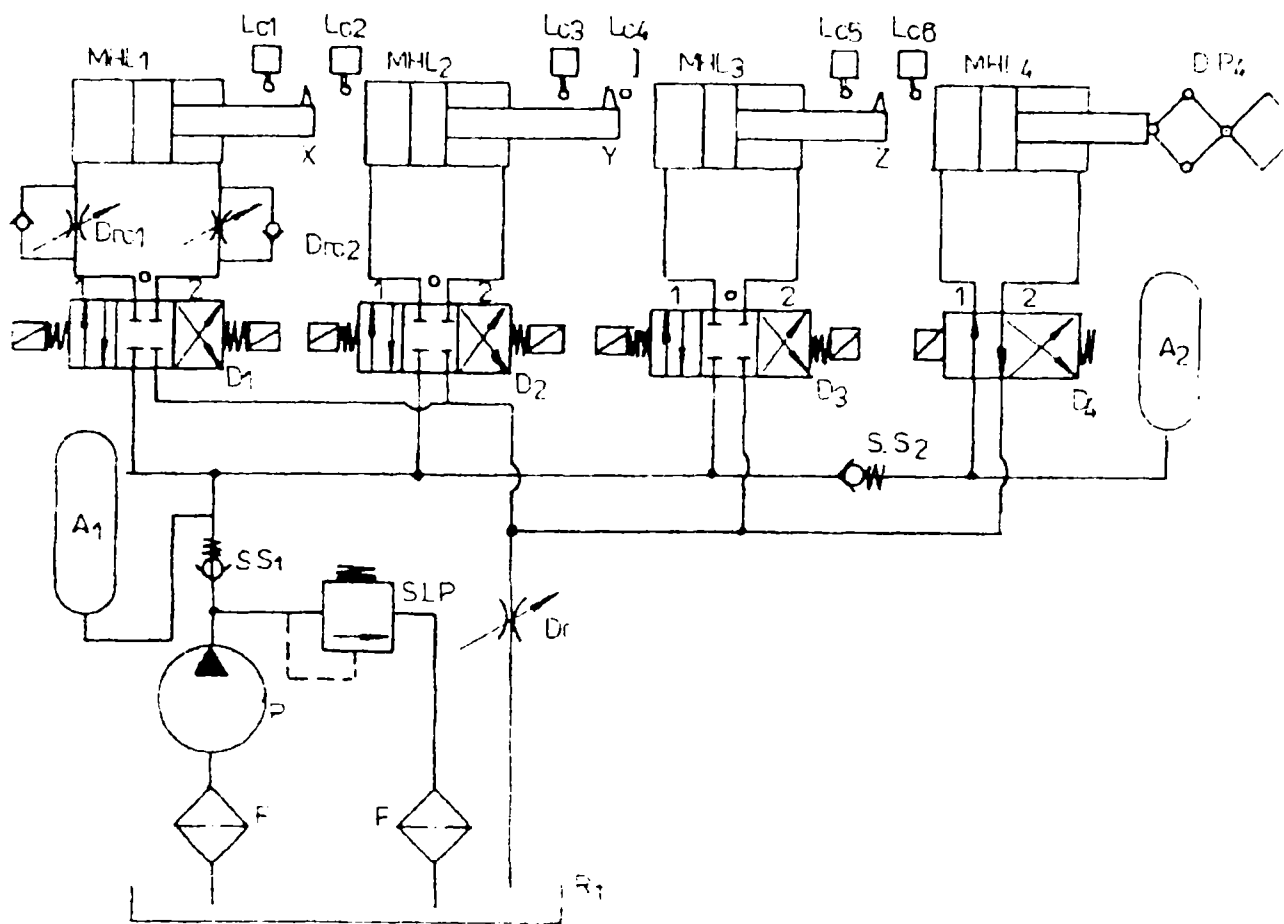


Fig.176 Schema hidraulică de acționare a unui robot cartezian TTT

Apariția acestor servosisteme a permis dezvoltarea așa numitei hidraulici proporționale, aplicabilă acolo unde se cere repetabilitatea ciclurilor, programabilitatea forțelor, deplasărilor și vitezelor, asigurarea unor funcții diferite de trecere de la un nivel de viteză la altul și o mare flexibilitate la programare. Echipamentele amintite asigură acționarea electro-hidraulică comandată analogic. Paralel cu dezvoltarea servosistemelor cu comandă analogică (continuă) s-a remarcat o revitalizare a sistemelor cu comandă discretă, determinată de cerințele practicii industriale și avantajele pe care acestea le conferă, în special sub aspectul simplității și al compatibilității lor cu microprocesoarele. Servosistemele cu comandă discretă (digitală) utilizează un motor electric pas cu pas de mică putere, care acționează sertarul de comandă al unei servovalve, asociată cu un motor hidraulic liniar sau rotativ. Pornind de la sistemul de conducere (comandă și acționare) electro-hidraulică prezentat s-au dezvoltat două tipuri de sistem de acționare electro-hidraulice utilizate în cadrul roboților industriali:

-acționarea electro-hidraulică servocomandată analogic (sistem de urmărire hidraulică),

-acționare electro-hidraulică servocomandată digital (deschise cu comandă numerică).

6.4.3.2 Acționarea elctro-hidraulică servocomandată analogic

Sistemele de comandă și acționare, servocomandate analogic, constau dintr-un servodistribuitor electrohidraulic (denumit în literatura engleză servovalvă) și un motor hidraulic, liniar sau rotativ. Servodistribuitorul primește un semnal sub forma unei tensiunii, transformându-l în parametri hidraulici (debit și presiune) proporționali cu valoarea crenului de comandă.

Motorul hidraulic convertește energia hidraulică în energie mecanică, formând împreună cu servodistribuitorul așa numitul " servomotor hidraulic ". Deplasarea respectiv rotația motorului hidraulic va fi proporțională deci cu semnalul de comandă aplicat. Schema bloc a unui sistem de acționare servocomandată analogic este prezentată în figura 177. prin intermediul traductoarelor se poate realiza reacția de poziție și de viteză sau numai de poziție.

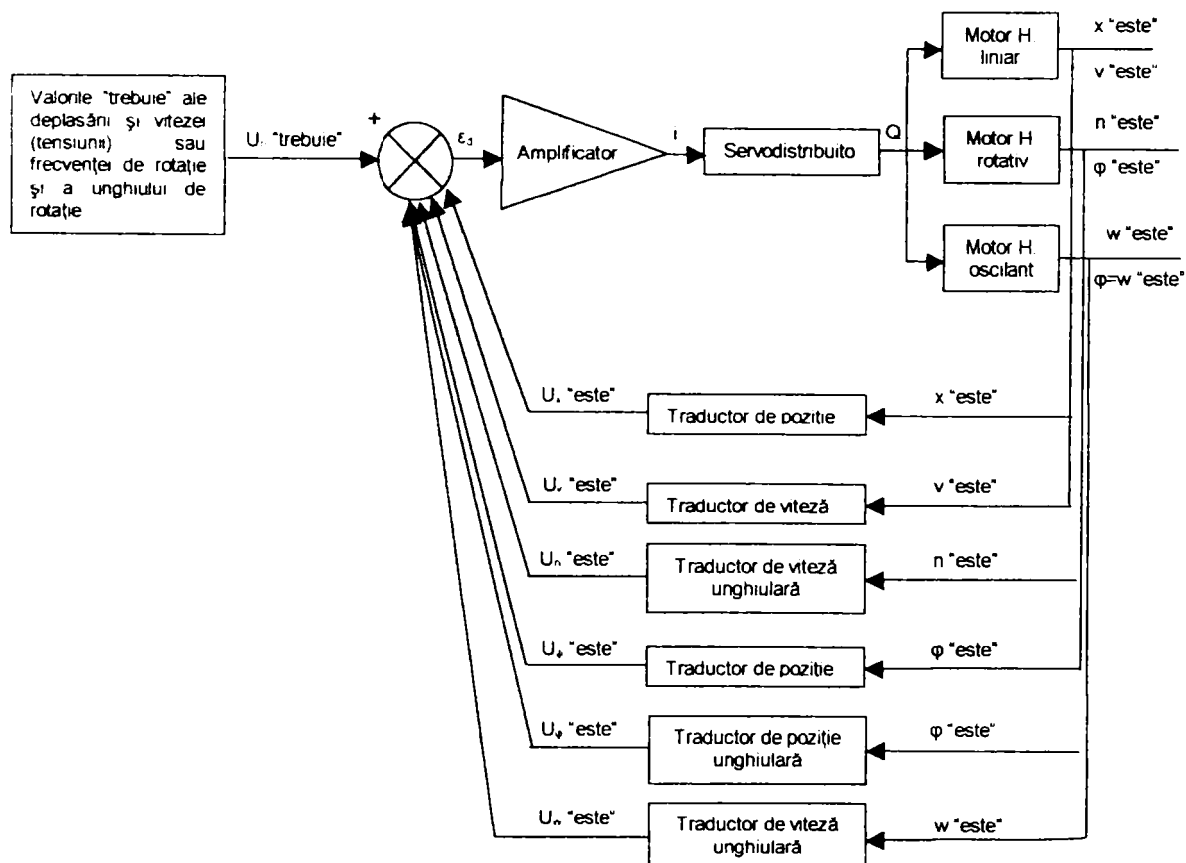


Fig.177 Schema bloc a sistemului de acționare electro-hidraulică analogică

Elementul de bază al servosistemelor analogice îl constituie servovalva (servodistribuitorul) sau distribuitorul proporțional. Ventilele proporționale realizează suplimentar și rolul de droselizare reglabilă, ceea ce permite comanda vitezelor și

acceleațiilor motoarelor. În acest fel se pot obține viteze mari (60-90 m/min) și precizii de poziționare până la $\pm 0,01$ mm. Ventilele de distribuție proporționale se utilizează fie în circuite de comandă, fie în circuite de reglaj automat. Dependența debitului semnal de intrare, amplificare de presiune și curba de răspuns la frecvență împarte ventilele de distribuție proporționale în:

- servodistribuitoare apte a fi folosite în circuite de reglaj automat (rapide);
- distribuitoare proporționale, apte a fi folosite în circuite de comandă.

6.4.3.3. Acționarea electro-hidraulică servocomandată digital (comandă numerică)

Sistemul de comandă și acționare servocomandat digital reprezintă un sistem hidraulic de precizie și a pătruns tot mai mult în acționarea roboților industriali, ca urmare a dezvoltării servosistemelor electro-hidraulice functionând în regim pas cu pas. Sistemul de acționare în regim pas cu pas satisface cerințele impuse roboților și manipuloarelor în ceea ce privește precizia de poziționare, fiabilitatea, domeniul de reglare al vitezelor etc. servosistemul electro-hidraulic pas cu pas se compune dintr-un motor electric pas cu pas, amplificatorul de cuplu și un motor hidraulic liniar sau rotativ.

În figura 178 se prezintă schema de principiu a unui servosistem liniar, la care motorul electric pas cu pas (MPP) constituie treapta de intrare, transformând semnalul de intrare digital-impuls electric, în mărime digitală de ieșire pas unghiular (θ) al rotorului acestuia. Șurubul de reacție pe care este lăgăruit axial sertarul al unui distribuitor proporțional se va deplasa axial împreună cu sertarul, acesta deschizând calea uleiului spre una din camerele motorului hidraulic, respectiv spre rezervor. Pistonul motorului hidraulic se va deplasa axial, deplasând sarcina exterioară și șurubul cu sertarul cu aceeași mărime în sens contrar comenzii, revenind în poziția mediană de echilibru hidrostatic. În acest fel se obține reacția internă, care anulează comanda inițială, sistemul fiind pregătit pentru preluarea unei noi comenzi (increment sau tren de impulsuri).

Rezultă că sistemul este de urmărire electro-hidro-mecanică, existând o interdependență strictă între poziția rotorului motorului electric pas cu pas și poziția pistonului pe lungimea cursei sale. Din modul de funcționare al sistemului rezultă că între pozițiile finite determinate ale rotorului motorului pas cu pas și pozițiile pistonului motorului hidraulic există o relație de corespondență biunivocă, acesta fiind principalul avantaj care dă posibilitatea funcționării sistemului în buclă deschisă.

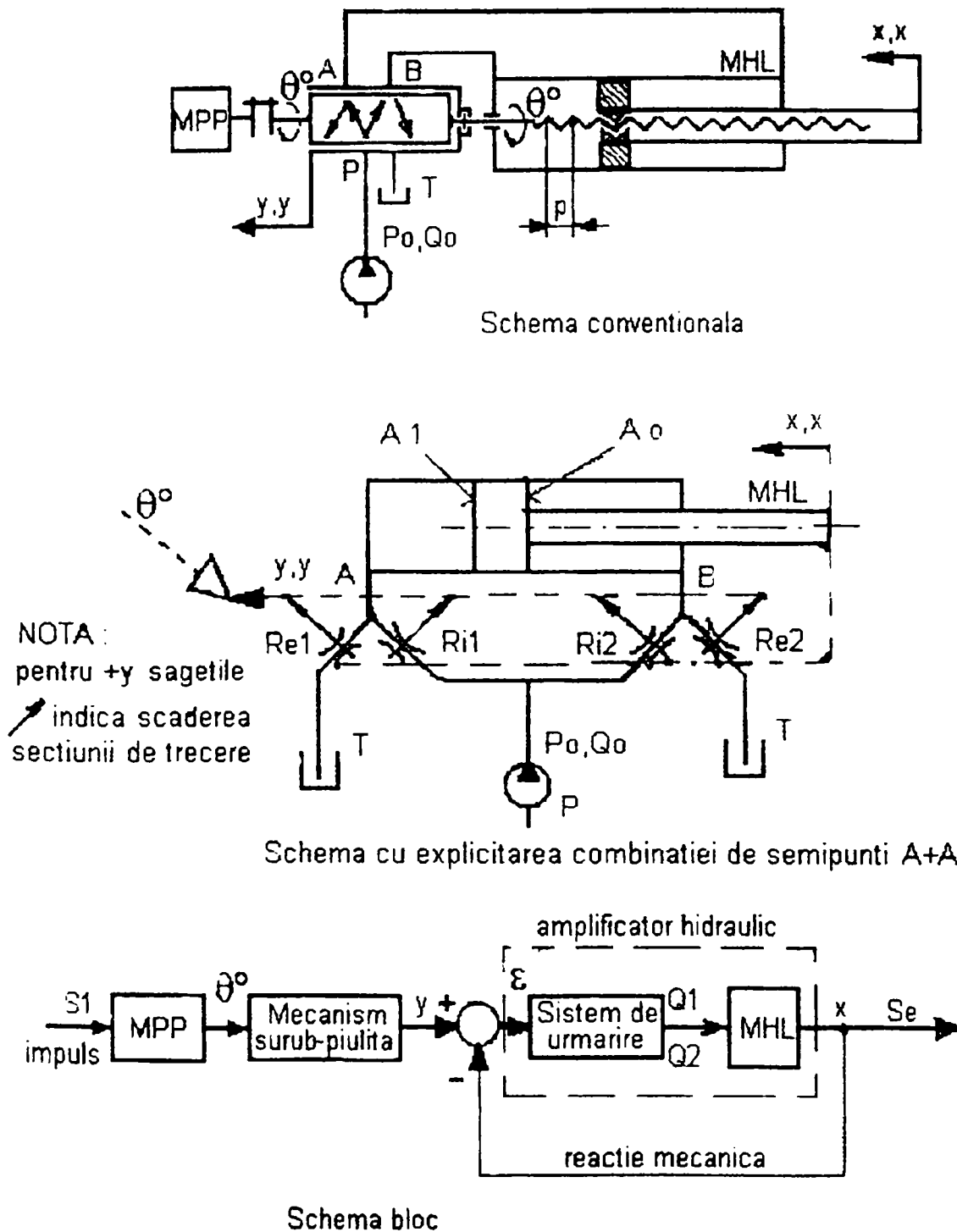


Fig.178. Scheme ale sistemului de translație cu acționare incrementală

Dacă se dorește închiderea unei bucle de măsură a deplasării, prin calculatorul de comandă al robotului, traductorul de deplasare poate fi montat direct pe axul MPP.

În figura 179 se prezintă schema de principiu a unui servosistem rotativ (rotație continuă sau limitată). În acest caz MPP, care preia printr-o interfață simplă impulsurile furnizate de echipamentul de conducere automată, pune în mișcare de translație sertarul servovalvei (amplificator hidraulic cu sertar), reglând astfel energia

fluidului de lucru. Se utilizează un angrenaj de multiplicat Z1-Z2, având și rol de corecție a pasului MPP și totodată a creșterii rezoluției de poziționare a elementului de ieșire.

Cu avantajele ce le prezintă, pe baza sistemelor de acționare electro-hidraulice în regim pas cu pas, se pot construi axe cinematice rapide de mare precizie pentru R.I. ce manipulează sarcini medii și grele. Acționarea electro-hidraulică a R.I. rămâne o soluție de bază în cazul roboților mijlocii și grei, unde celelalte moduri de acționare nu mai satisfac din cauza gabaritului mare și a consumului energetic ridicat.

Deși soluțiile par mai complicate, sistemele de acționare electro-hidraulice sunt mai ieftine decât cele electrice la aceeași putere instalată – cu servoelemente de puteri mici se pot comanda puteri hidraulice de sute de ori mai mari.

Este demn de remarcat că în etapa actuală, între toate tipurile de acționare nu este vorba numai de relații de subordonare sau de prioritate, ci mai ales de o continuă coabitare sau chiar o competiție.

Acționarea hidraulică – ca beneficiar inteligent – a profitat din plin de progresele remarcabile ale electronicii și microelectronicii și printr-o simbioză fericită după cum s-a arătat a permis realizarea unor echipamente mixte electrohidraulice de mare performanță.

Cerințele din ce în ce mai ridicate în privința parametrilor de performanță ai echipamentelor de acționare continuă competiția dintre diversele sisteme de acționare, pure și mai ales mixte, conducând la o firească perfecționare a fiecăruia dintre acestea și convergența tuturor înspre maximizarea acestor performanțe.

O caracteristică esențială a revoluției tehnico-științifice actuale o constituie explozia informațională, ritmul alert nemaiântâlnit de creștere și acumulare a unui tezaur uriaș de cunoștințe, a fluxului de informații care face tot mai dificilă urmărirea, asimilarea și utilizarea lor. În acest context informatica, ce reprezintă cea mai modernă și actuală tehnică de înregistrare, stocare, prelucrare și transmitere a informației este indispensabilă în orice domeniu de activitate și în special în domeniul conducerii roboților.

Pe această linie de informatizare se înscrie și domeniul acționărilor hidraulice în vederea utilizării cât mai depline a tehnicilor moderne de analiză și sinteză de concepere a unor structuri de echipamente cu parametrii constructiv-funcționali și performanțe prestabilite, dar și de eficientizare a alegerii implementării și utilizării echipamentelor hidraulice de acționare în cele mai diverse domenii ale tehnicii și tehnologiei actuale și în special în domeniul comenzilor numerice (mașini unelte, roboți industriali, etc.)

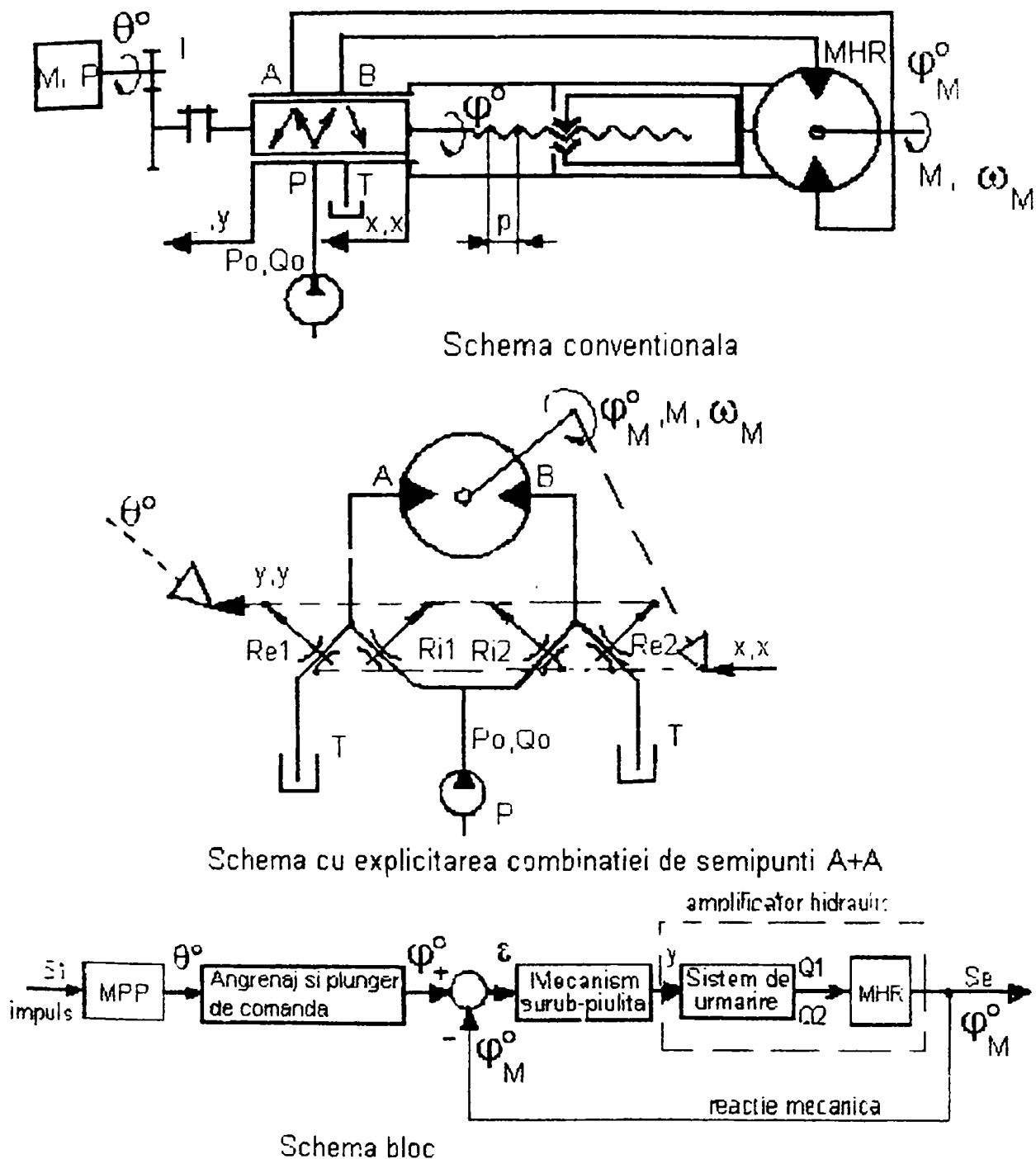


Fig.179 Scheme ale sistemului de rotație cu acționare incrementală.

Optimizarea acționărilor hidraulice ale roboților industriali

7.1. Introducere

Progresele generale realizate în electronică, electrotehnică, știința calculatoarelor și cibernetică au pus și mai mult în valoare remarcabilele calități pe care le au sistemele hidraulice de acționare, care au cuprins o vastă arie de aplicații, de la mașini-unelte cu comenzi numerice, roboți industriali comandați de microprocesoare, capabili de cele mai complicate și fine manevre, până la fascinantul domeniu al presiunilor înalte de sute de bari.

Tendința generală de extindere și diversificare a echipamentelor hidraulice de acționare are loc pe măsura creșterii performanțelor tehnice și a calității acestor echipamente.

Presiunea reprezintă parametrul principal al acționărilor hidraulice, care are cum s-a arătat mai sus tendința de creștere continuă. Creșterea presiunii lichidului hidraulic conduce la reducerea substanțială a gabariturii echipamentelor, deci la miniaturizarea acestora, având ca efect creșterea eficienței economice, respectiv creșterea vitezelor (concentrarea în timp).

Fiabilitatea echipamentelor hidraulice este unul din indicatorii calitativi de bază care se cere a evolua concomitent cu creșterea presiunilor de lucru. Cercetările actuale au arătat că unul din elementele slabe ale unui circuit hidraulic îl constituie mediul hidraulic, deoarece 80 din defectele sistemului se datorează transformărilor ce au loc în acesta. Al doilea element slab al acționărilor hidraulice îl constituie etanșările, care contribuie în proporție de circa 40 la defectiunile în exploatare.

Creșterea fiabilității și a duratei de viață este condiționată de ridicarea preciziei de execuție a componentelor, utilizarea unor materiale cu caracteristici superioare și metode adecvate de tratamente termice, descărcarea hidrostatică a cuplelor de frecare, precum și utilizarea unor lichide de lucru corespunzătoare cu menținerea în timp a caracteristicilor lor optime.

O altă problemă căreia i se acordă o atenție deosebită este reducerea nivelului de zgomote. Cercetările experimentale arată la majoritatea mașinilor și utilajelor nivelul de zgomot este cuprins în limitele 85-95dB, iar în timpul funcționării la turație maximă acesta se ridică la 95-100dB, la care o contribuție însemnată o are sistemul

hidraulic care are și un domeniu de frecvențe nefavorabil. Sursele cu cel mai mare nivel de zgomot le constituie pompele, supapele, distribuitorii și conductele hidraulice. Pentru reducerea zgomotului se recomandă reducerea turațiilor, a cantității de aer ce intră în instalație, reducerea pulsațiilor de debit, etc.

O etapă importantă în evoluția acționărilor hidraulice a avut-o apariția în anii '50 în S.U.A. și fosta U.R.S.S. a servoventilului, destinat inițial tehnicii aerospațiale. El a fost preluat cu satisfacție de către industrie, constituind o importantă interfață între hidraulică și electronică, aflată în plină dezvoltare. S-a constatat însă că servoventilul este prea mic și prea scump pentru necesitățile industriale curente. De asemenea prezintă și o sensibilitate exagerată la impurități, consum de ulei relativ mare (în circuitul de comandă), cădere mare de presiune, la parcurgerea lui și de aici, bilanțul energetic nefavorabil.

Pentru reducerea acestor dezavantaje, servoventilul a fost combinat (ca ventil de pilotare) cu distribuitorii (ca trepte de putere) ale căror sertare pot ocupa poziții intermediare de droselizare. Cu acest pas a apărut conceptul de ventil proporțional.

O altă etapă importantă în dezvoltarea acționărilor hidraulice s-a realizat odată cu obținerea electromagneților proporționali. Aceștia asigură dezvoltarea unei forțe proporționale cu curentul care le străbate bobina, independent de poziția armăturilor hidraulice proporționale. Utilizarea echipamentelor hidraulice dotate cu electromagneți domeniul energiilor mici adică al electronicii. Această tehnică își găsește câmp larg de aplicații în domeniul roboților industriali, a mașinilor-unelte, mașini de injectat mase plastice, a preselor, etc., acolo unde se cere repetabilitatea ciclurilor, programabilitatea forțelor, deplasărilor și vitezelor, asigurarea unor funcții diferite de trecere de la un nivel de viteză la altul și o mare flexibilitate la programare.

Tehnica hidraulicii proporționale permite în mod excelent utilizarea microprocesorului și conducerea adaptivă a proceselor.

Cu utilizarea echipamentelor hidraulice proporționale se obțin o serie de avantaje cum sunt: posibilitatea creșterii vitezelor motoarelor hidraulice (datorită faptului că asigură accelerații diferite și profile diferite pentru viteze), absența șocurilor la inversarea mișcărilor (deoarece se pot asigura rampe de trecere de la o viteză la alta), creșterea preciziei de funcționare a motoarelor (datorită posibilității de utilizare a reglajului automat), înlocuirea numărului mare de echipamente hidraulice convenționale (pentru realizarea unui anumit circuit), cu un număr considerabil mai mic de echipamente proporționale, etc.

Posibilitatea implicării ventilelor cu electromagneți proporționali în automatizări, impune asocierea lor cu senzorică, cu regulatoarele electronice și cu microprocesoarele. Domeniile până acum distincte ale servoventilelor și al ventilelor proporționale s-au apropiat și intersectat putând fi cuprinse în conceptul de ventile proporționale.

În ce privesc elementele de execuție (motoarele hidraulice), pentru realizarea mișcărilor de rotație se demonstrează necesitatea perfecționării sistemelor volumice (convertizoare de cuplu și putere).

Acestea asigură realizarea unor rapoarte de transfer mari, a unor momente și viteze de răspuns ridicate la arborele de ieșire. Transmisiile volumice se utilizează cu mare eficiență la momente de 100 – 25000 daNm, turații cuprinse în domeniul de 10-5000 rot/min și puteri mari. În privința motoarelor rotative utilizate în acționarea roboților industriali există preferința pentru cele cu pistonă axiale, cu palete mai rar cele cu pistonă radiale și cele cu role și palete Rollstar și Hartmann, cu roți dințate etc. de remarcă este apariția și extinderea rapidă a servosistemelor electrohidraulice utilizate în sistemele de reglare automată, fără reductor mecanic, având cuplul motor cuprins în domeniul 1-20daNm și domeniul de reglare al turațiilor între 0.1-2500 rot/min.

În domeniul motoarelor hidraulice liniare, se constată o utilizare tot mai frecventă în cadrul sistemelor electrohidraulice de reglare automată de tip rezistiv, ceea ce permite legarea directă a servomotorului la sarcină, asigurând realizarea unui sistem rigid fără joc, viteză mare de răspuns, durabilitate superioară față de motoarele rotative, simplitate constructivă (prin absența unui transformator mecanic al mișcării), fiabilitate superioară, ușurință în privința racordării aparatului electronic de măsurare, control și comandă. Cerințele față de motoarele liniare privesc utilizarea rațională și eficientă a lor, creșterea preciziei de deplasare, a vitezelor și puterii, precum și ameliorarea în continuare a caracteristicilor dinamice și energetice.

Creșterea performanțelor dinamice ale servosistemelor electrohidraulice, de regulă se rezolvă acționând asupra subsistemului de comandă, prin sinteza celor mai bune elemente de corecție, alegerea unei structuri optime a regulatorului și legăturilor de reacție. Subsistemul de forță (energetic) se consideră, de regulă ca "dată inițială", ori se constată că cele mai mari rezerve de creștere a performanțelor dinamice se află tocmai în acest subsistem.

Din punct de vedere constructiv, motoarele hidraulice liniare nereglabile, n-au suferit modificări deosebite, cu excepția sistemului de etanșare a sistemelor de frânare la capete de cursă, a elementelor de centrare și ghidare, ca urmare a creșterii nivelelor de presiune și viteză.

În ultima perioadă, ca urmare a dezvoltării producției de roboți industriali se constată tendința de realizare a unor motoare hidraulice liniare cu cursă reglabilă cu posibilitatea de reglare discretă a cusei, precum și a motoarelor cu aparatura de comandă, de măsurare și control inclusă, realizându-se o construcție compactă și de rigiditate ridicată.

Tipurile de motoare hidraulice utilizate în acționarea roboților sunt prezentate în paragraful 7.2.2.

7.2. Structura și organologia sistemelor hidraulice de acționare a roboților industriali

7.2.1. Introducere

Sistemul de acționare hidraulică este compus dintr-o serie de elemente electrice hidraulice și mecanice care transformă printr-o serie de conversiuni intermediare de energie mărimea electrică de intrare Y_i (tensiune U și curent I) într-o mărime de ieșire, mărime ce se produce cu o anumită viteză v , sau turație n .

Schema bloc a unui sistem de acționare hidraulică este prezentată în figura 180.

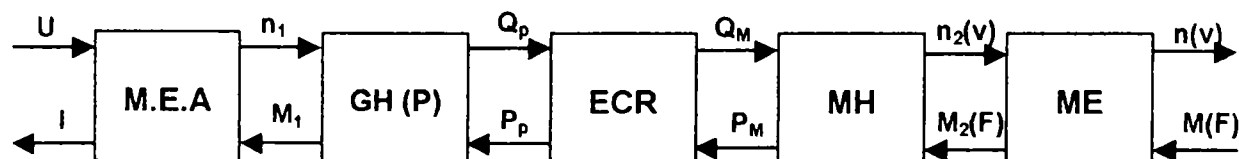


Fig.180. Schema bloc a unui sistem de acționare hidraulică

Din structura sistemului de acționare hidraulică se distinge subsistemul hidraulic de acționare format din elementele de bază ale transmisiei hidrostactice, generatorul hidraulic (pompa GH) și motorul hidraulic (MH), care realizează dubla conversie de energie mecanică-hidrostatică, hidrostatică-mecanică. Deci subsistemul hidraulic primește – transmite o energie mecanică. Energia mecanică de intrare este asigurată de către motorul electric de acționare (MEA), care la rândul său primește din exterior o energie electrică (U, I). În interiorul său subsistemul hidraulic are o

serie de elemente de comandă și control (ECR), care conferă mărimilor mecanice de ieșire valorile de mișcare și efort necesare mecanismului final de execuție (ME).

În structura unui R.I., mecanismul de execuție este un element al unei cuple cinematice conducătoare, sau efector final, care trebuie să se rotească sau să se deplaseze cu rotația n , sau viteza v .

Pentru aceasta motorul hidraulic de acționare trebuie să învingă un cuplu M , respectiv o forță F , în care scop este necesară prezența debitului Q și a presiunii p , furnizate de generatorul hidraulic (GH), antrenat de către motorul (MEA).

Schema reprezentată în figura 9.1 în accepțiunea sistemică, reprezintă un sistem multivariabil în care blocurile sunt elemente hidraulice componente (multipolare), iar liniile de conexiune (polii) reprezintă suportul de informații al variabilelor.

7.2.2. Motoare hidraulice folosite în acționarea roboților industriali

Motoarele hidraulice reprezintă elementele de execuție, sau forță din cadrul unei acționări hidraulice care transformă energia mediului hidraulic în energie mecanică, necesară punerii în mișcare a cuplelor cinematice conducătoare. Și în acest caz se poate afirma că performanțele sistemului de acționare în ansamblu în ceea ce privește viteza de răspuns, precizia de poziționare și randamentul. Clasificarea motoarelor hidraulice se face conform schemei din figura 181.

În tabelul 23 se prezintă principalele tipuri de motoare hidraulice utilizate mai frecvent în acționarea R.I., și caracteristicile lor principale.

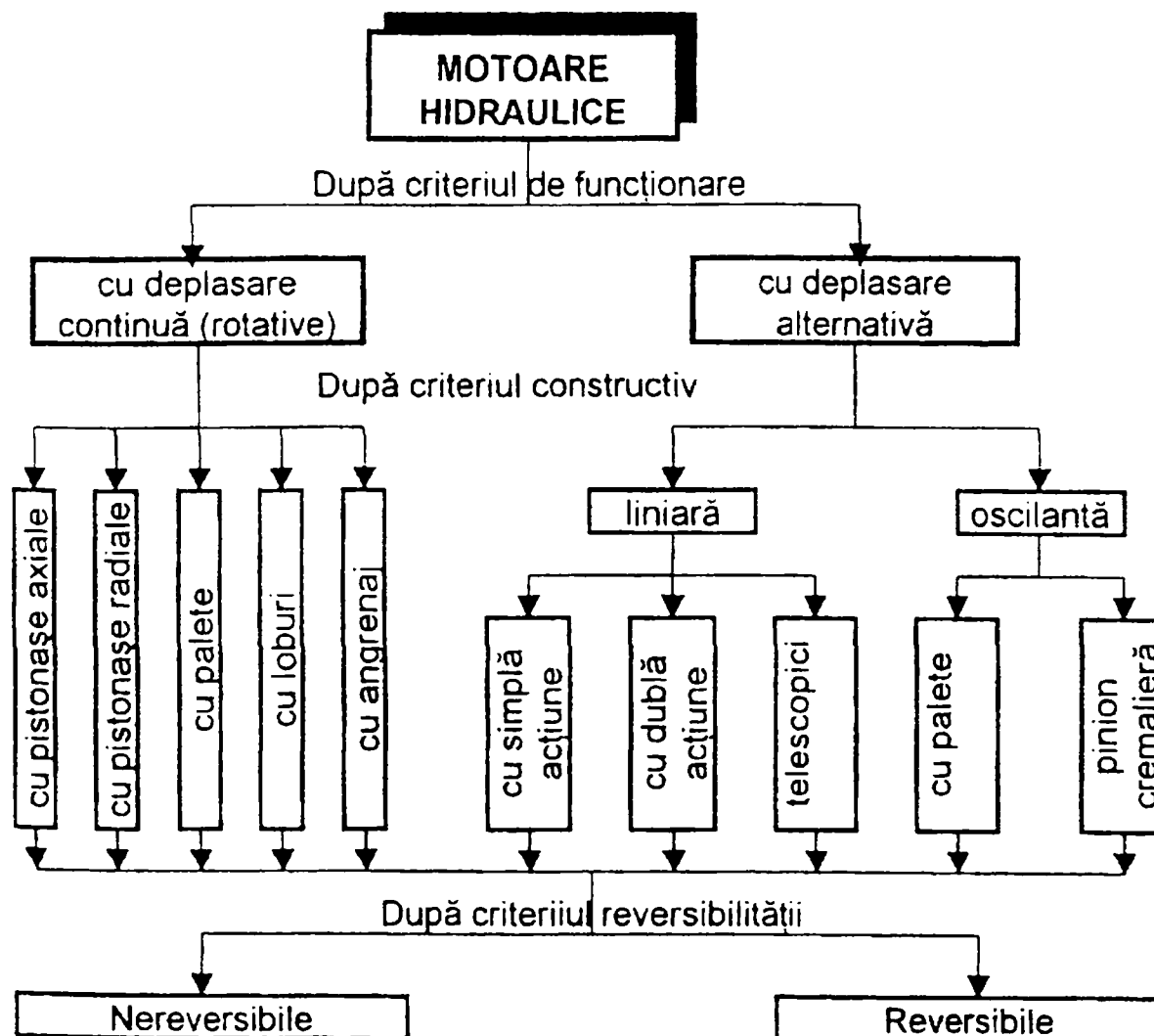


Fig.181. Clasificarea motoarelor hidraulice

7.2.3 Echipamente de distribuție (distribuitoare)

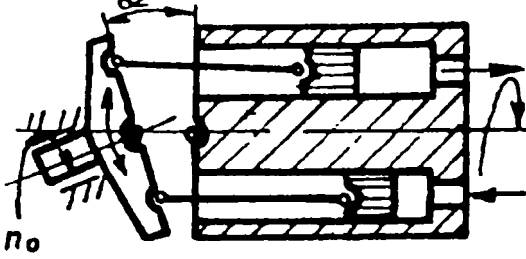
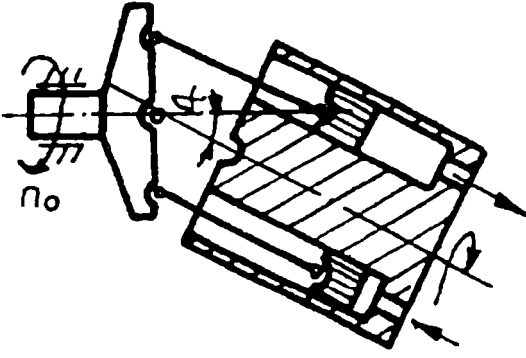
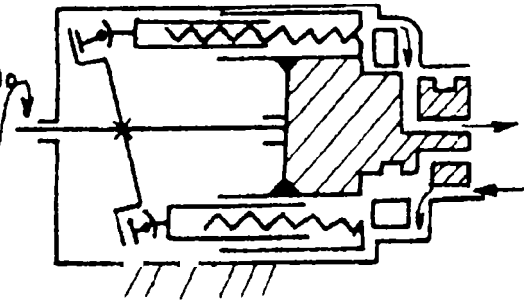
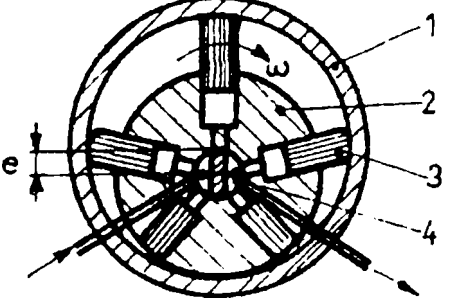
7.2.3.1. Introducere

Echipamentul de distribuție îndeplinește funcția de asigurare a alimentării motorului hidraulic cu fluid, în cantitatea și la presiunea necesară pentru o funcționare optimă a acestuia la parametrii de efort și mișcare programată.

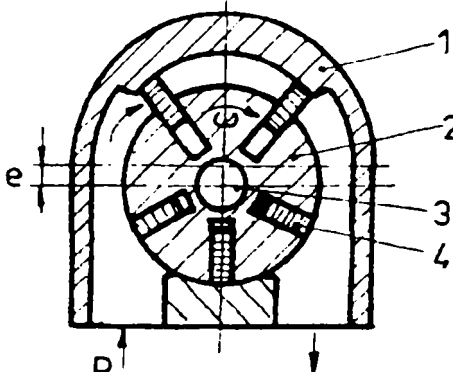
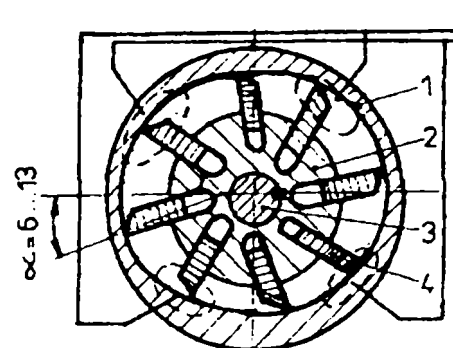
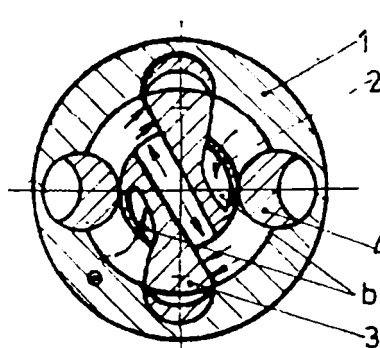
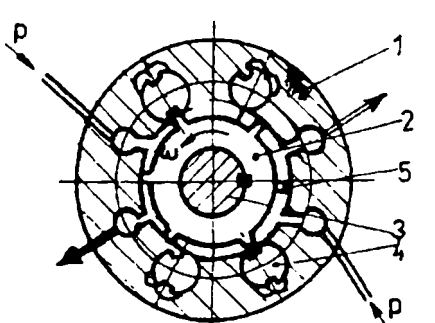
Cu ajutorul distribuitorului se comandă pornirea, oprirea și direcția curentului mediului hidraulic determinând astfel ca efect final direcția de mișcare sau poziția de oprire a unui consumator.

Acțiunile distribuitorului sunt urmări ale unor comenzi exterioare ce pot fi: manuale, mecanice, electrice, pneumatice, hidraulice sau electrohidraulice. Distribuitorii pot fi considerate elemente ce permit realizarea condiționărilor dintre circuitul de comandă și cel de forță.

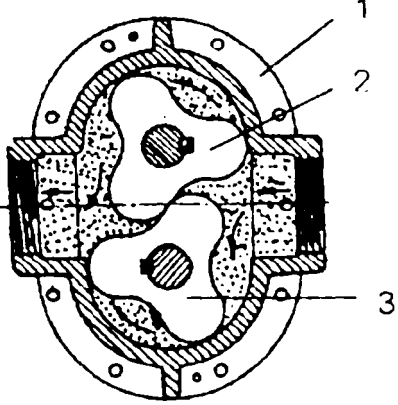
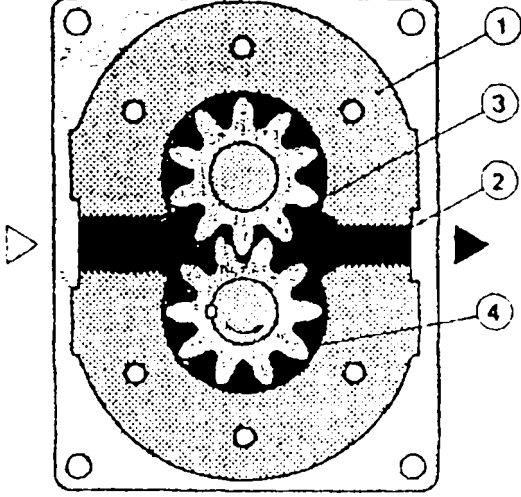
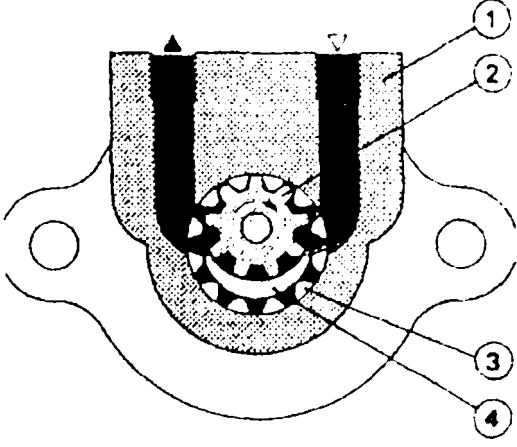
Tabelul 23 Tipuri de motoare hidraulice utilizate în acționarea R.I.

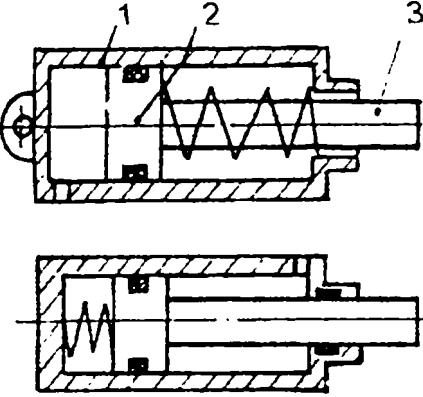
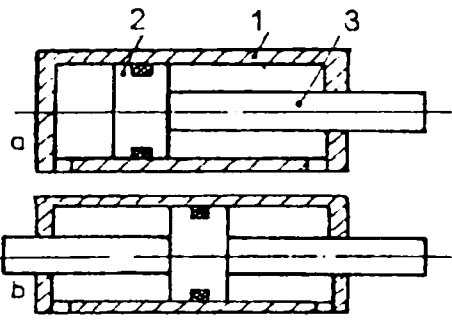
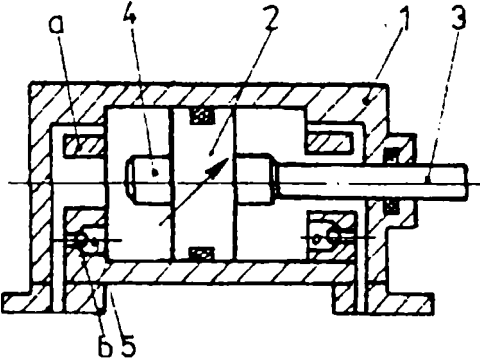
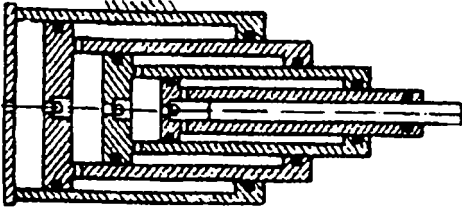
Tipul motorului	Schema de principiu	Caracteristici principale Firme constructoare
Cu pistonăse axiale, A disc înclinat		$Q_{min/max}=75-2000[l/min]$ $P_{min/max}=16-80[Mpa]$ $N_{min/max}=0.1-4500[rot/min]$ $\eta=0.8-0.92$ $M=800-900[daNm]$ I.M.Plopeni; Vickers-SUA; EATON – SUA Bosch-Germania.
cu pistonăse axiale, B bloc înclinat		idem A $N_{min/max}=200-3000[rot/min]$ Von-Roll-Germania Hidromatic-Germania; Vickers-SUA.
cu pistonăse axiale, C disc fulant		Idem A Peyrolle-Anglia; Towler-Anglia.
cu pistonăse radiale, D alimentare interioară		$Q_{min/max}=100-8000[l/min]$ $P_{min/max}=16-40[Mpa]$ $n_{min/max}=1-3000[rot/min]$ $\eta=0.88-0.90$ $M=până\ la\ 5000[daNm]$ Progresul Brăila; Rexhoth SUA.

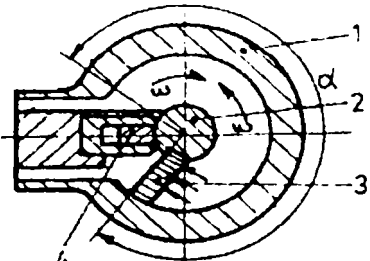
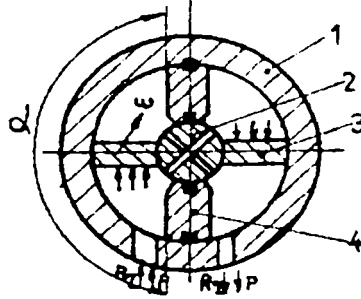
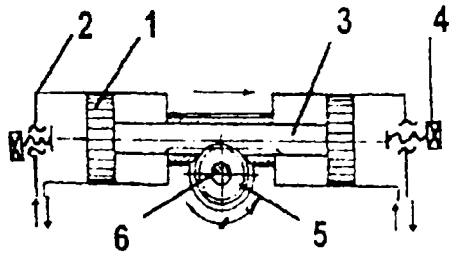
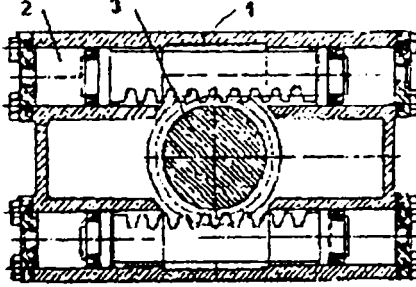
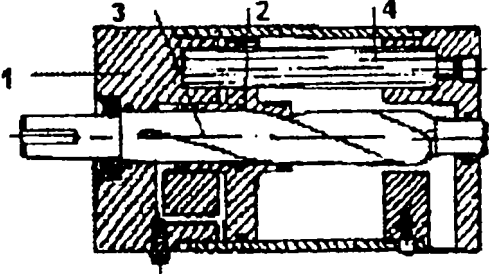
Tabelul 3.1 Continuare

Tipul motorului	Schema de principiu	Caracteristici principale Firme constructoare
<p>Cu palete cu simplă acțiune E</p>		<p> $Q_{min}/max=1-1000[l/min]$ $P_{min}/max=7-16[Mpa]$ $n_{min}/max=50-3500[rot/min]$ $\eta=0.8-0.93$ $M=200-1000[daNm]$ I.M.Plopeni; Recine -SUA; Vickers – SUA Rexroth -Germania. </p>
<p>Cu palete cu dublă acțiune F</p>		<p> $Q_{min}/max=50-950[l/min]$ $P_{min}/max=10-22[Mpa]$ $n_{min}/max=50-3000[rot/min]$ $\eta=0.8-0.93$ $M=200-1000[daNm]$ I.M.Plopeni; Recine -SUA; Vickers – SUA Rexroth -Germania. </p>
<p>Lent cu pistoane rotative G HARTMAN</p>		<p> $P_{min}/max=15-20[Mpa]$ $n_{min}/max=1-1000[rot/min]$ $M=700-3000[daNm]$ HARTMAN </p>
<p>Tip ROLLSTAR H</p>		<p> Idem J ROLLSTAR </p>

Tabelul 23 Continuare

Tipul motorului	Schema de principiu	Caracteristici principale Firme constructoare
Cu loburi I		$Q_{min}/max=50-2000[l/min]$ $P_{min}/max=1.6-30[Mpa]$ $n_{min}/max=800-1500[rot/min]$ $\eta=0.7-0.8$ $M=10-100[daNm]$ Danfost -Germania.
Cu angrenaj evolventic exterior birotor J exterior birotor		$Q_{min}/max=10-3500[l/min]$ $P_{min}/max=6-20[Mpa]$ $n_{min}/max=400-3000[rot/min]$ $\eta=0.7-0.91$ $M=15-180[daNm]$ I.M.Plopeni; Vickers – SUA
Cu angrenaj evolventic interior K interior		$Q_{min}/max=10-1000[l/min]$ $P_{min}/max=6-20[Mpa]$ $n_{min}/max=500-3000[rot/min]$ $\eta=0.7-0.91$ $M=10-4000[daNm]$ I.M.Plopeni; Vickers – SUA

Tipul motorului	Schema de principiu	Caracteristici principale Firme constructoare
LINIARE	<p>cu simplă acțiune M</p> 	<p>$P_{min}/max=10-16$[Mpa] Cursa=25-2000[mm] $F=7000-25000$[daN] I.M.Plopeni; I.M.Timișoara; Recine -SUA; Bosch-Germania; Rexroth -Germania.</p>
	<p>cu dublă acțiune -tijă unilaterală -tijă bilaterală N</p> 	<p>$P_{min}/max=10-32$ [Mpa] Cursa=25-3200[mm] $F=7600-49000$[daN] I.M.Plopeni; I.M.Timișoara; Bosch-Germania; Rexroth -Germania.</p>
	<p>Cu frânare la capete de cursă O</p> 	<p>$P_{min}/max=10-32$ [Mpa] Cursa=60-160[mm] $F=5900-64300$[daN] I.M.Plopeni; I.M.Timișoara; Bosch-Germania; Rexroth -Germania.</p>
	<p>telescopic P</p> 	<p>$P_{min}/max=10-32$ [Mpa] Cursa=400-11000[mm] $F=4400-11300$ daN</p>

Tipul motorului	Schema de principiu	Caracteristici principale Firme constructoare
Cu o paletă Q		$\alpha < 360^\circ$ $P = 6.3 - 20 \text{ [Mpa]}$ $\eta = 0.6 - 0.7$ $M = \text{până la } 400 \text{ [daN]}$ XLO - SUA
Cu două palete R		$\alpha < 180^\circ$ $P = 6.3 - 20 \text{ [Mpa]}$ $\eta = 0.6 - 0.7$ $M = \text{până la } 800 \text{ [daN]}$
Pinion cremalieră simplă S		$\alpha < 360^\circ$ $P = 6.3 - 32 \text{ [Mpa]}$ $\eta = 0.6 - 0.7$ $M = \text{până la } 2650 \text{ [daN]}$ R...xroth-Germania.
Cu pinion cremalieră dublă T		$\alpha < 360^\circ$ $P = 6.3 - 32 \text{ [Mpa]}$ $\eta = 0.6 - 0.75$ $M = \text{până la } 2650 \text{ [daN]}$ Rexroth-Germania.
Cu piston și șurub U		$\alpha < 360^\circ$ $P = 6.3 - 32 \text{ [Mpa]}$ $\eta = 0.6 - 0.7$ $M = \text{până la } 2600 \text{ [daN]}$

OSCILANTE

Echipamentul de distribuție trebuie să asigure o inversare liniștită fără șocuri, un timp minim de inversare, pierderi minime de putere și o poziție precisă a organului inversat în punctele finale.

Din punct de vedere al caracteristicilor mișcării echipamentele de distribuție pot fi subîmpărțite în echipamente de distribuție pentru funcționare discretă sau continuă (analogică). Din prima categorie fac parte distribuitorii clasice cu una, două, trei, sau mai multe poziții, având două, trei sau mai multe canale de legătură cu restul echipamentelor, care funcționează pe principiul "totul sau nimic" (tehnic "alb-negru") și sunt utilizate în acționarea hidraulică secvențială, neavând posibilitatea de control și reglaj al vitezelor.

În acționarea RI cele mai utilizate distribuitorii clasice sunt distribuitorii cu sertare (pistonaș) datorită unor avantaje ca: formă constructivă relativ simplă; randament de cuplare mai mare; o foarte bună echilibrare a presiunii, deci forțe de acționare reduse; pierderi mici; mari multitudini de funcții de comandă.

În figura 182 se prezintă principalele tipuri de distribuitorii cu sertar longitudinal, diferențiate prin sistemul de comandă. Comanda poate fi realizată prin curent continuu cu electromagneți cu cuplare în aer sau ulei (1) și (2), (figura 182.a.), prin curent alternativ cu electromagneți cu cuplare în aer sau ulei (1) și (2) (figura 182.b.), sau comandă fluidică (pneumatic sau hidraulic) prin pistonașele (1) și (2) (figura 182.c.). Sertărașul (3) este menținut în poziție inițială de echilibru de către arcurile (4). Aceste distribuitorii sunt produse de firmele: Rexroth, Bosch, Moog, Vickers, Balanța Sibiu, etc.

Distribuitorii cu mărimi nominale D_n mai mari adică puteri hidraulice sporite ($P=p \cdot x \cdot Q$) se execută în construcție pilotată. Motivul este forța de acționare necesară pentru deplasarea sertarului mult mai mare.

În principal un distribuitor pilotat este format dintr-o supapă principală (distribuitor) comandat hidraulic și o supapă (distribuitor) de comandă cu supapă pilotată electric, pneumatic sau hidraulic.

În figura 183.(a,b) se prezintă două tipuri de distribuitorii cu sertare pilotate comandate electrohidraulic, produse de firma Rexroth.

- a) Distribuitor de comandă cu supapă pilotată electric;
- b) Distribuitor de comandă cu supapă pilotată hidraulic.

Supapa pilotată este un distribuitor 4/3 (patru căi, trei poziții) centrat cu arcuri. Supapa de pilotare este alimentată cu lichid de comandă prin orificiul (5) cu aducție

internă sau externă. Dacă se acționează electromagnetul din dreapta, acesta împinge pistonul spre stânga.

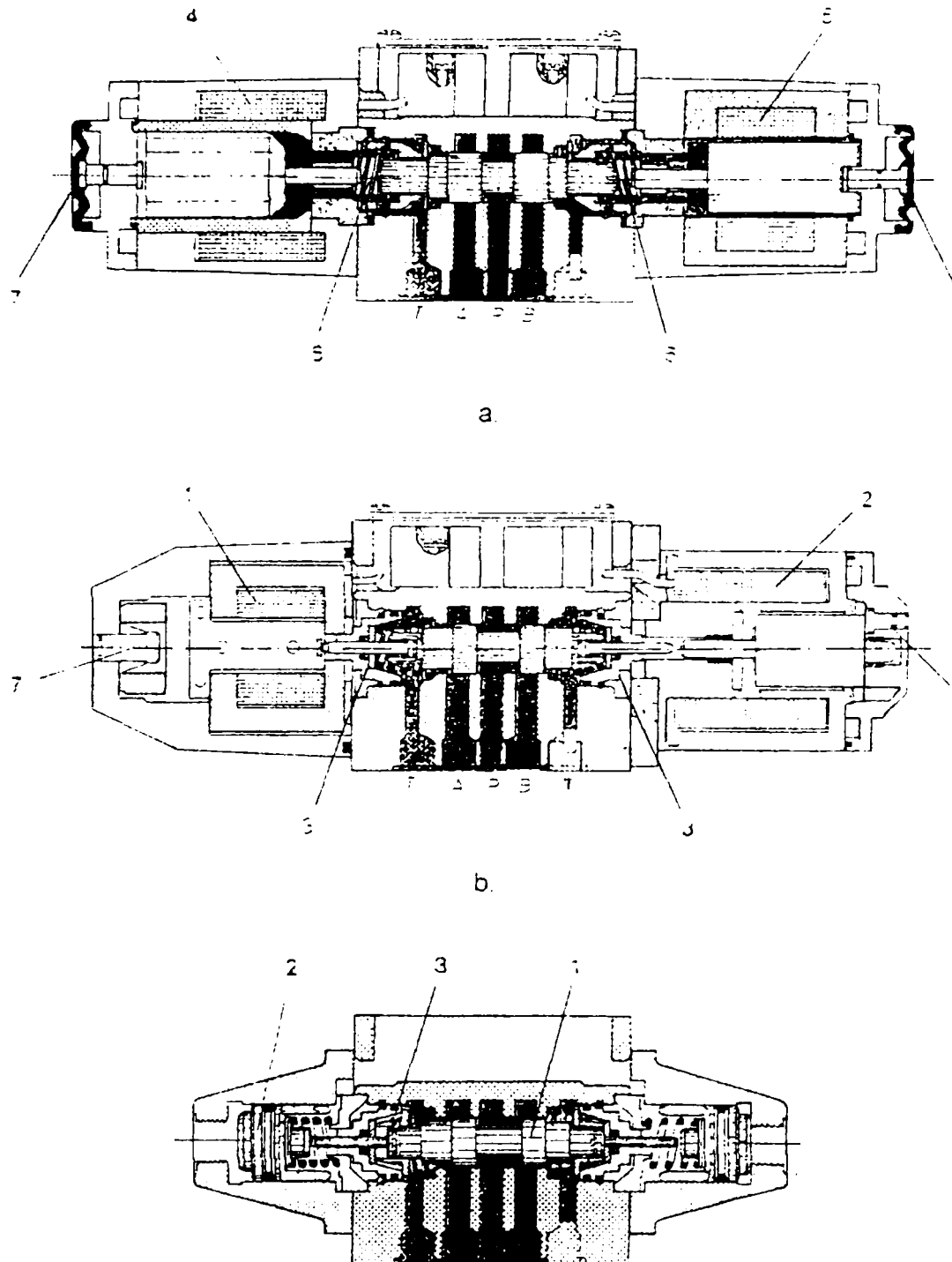


Fig.182. Echipamente de distribuție discrete cu sertar:
 a- cu comandă electrică prin curent continuu;
 b- cu comandă electrică prin curent alternativ;
 c- cu comandă hidraulică (sau pneumatică)

În camera (6) pătrunde presiunea de comandă, iar camera (7) este pusă în legătură cu rezervorul, astfel încât sertarul (3) (pilotat) va fi deplasat spre dreapta, realizându-se legăturile A-T și P-B. comutarea pentru poziția stânga de cuplare se efectuează la fel. În figura 9.4.b. se prezintă un distribuitor cu sertar pilotat electrohidraulic centrat de presiune.

În acest caz camerele de comandă (6) și (7) sunt legate permanent la presiunea de comandă hidraulică prin poziția centrală a supapei de pilotare, realizând echilibrul supapei pilotate (3) (pistonaș). Arcurile elicoidale au rolul de a menține centrarea pistonașului (3) la montarea pe verticală a distribuitorului din dreapta, pistonul de pilotare va fi deplasat spre stânga, astfel încât camera (6) rămâne racordată la presiunea de comandă, iar camera (7) va fi pusă în legătură cu rezervorul. Pistonașul (3) se va deplasa sub acțiunea forței de presiune spre dreapta. La eliminarea excitării electromagnetului, supapa de pilotare revine în poziția centrală și camera (7) va fi din nou pusă sub presiune de comandă, realizându-se centrarea pistonașului (3). Comanda se poate face extern prin racordul X, sau intern prin racordul (12) de la presiunea de acționare.

La cele două tipuri de distribuitoare prezentate, pentru reglarea timpului de cuplare se utilizează o supapă dublă de reținere (16), montată între supapa de pilotare și supapa pilotată (principală). Prin aceasta se strangulează secțiunea de trecere a lichidului condus, sau evacuat din camerele de comandă, influențându-se astfel timpul de cuplare al sertarului, respectiv timpul de răspuns.

Aceste tipuri de distribuitoare sunt produse și la noi în țară, la Sibiu, după licență Bosch.

Echipele de distribuție cu funcționare continuă, care au căpătat o răspândire din ce în ce mai mare în ultima vreme, au apărut sub denumirea de servodistribuitoare, servovalve, sau distribuitoare proporționale, utilizându-se în special în sistemele de reglare automată.

7.2.3.2. Servodistribuitoare

Servodistribuitorul are la bază servoventilul, echipament apărut prin anii 50 în SUA și URSS, utilizat inițial în tehnica aerospațială, care a fost combinat cu distribuitoare generos dimensionate (ca trepte de putere) a căror sertare pot ocupa poziții intermediare de droselizare. Cu acest pas a apărut de fapt conceptul de ventil proporțional (servodistribuator).

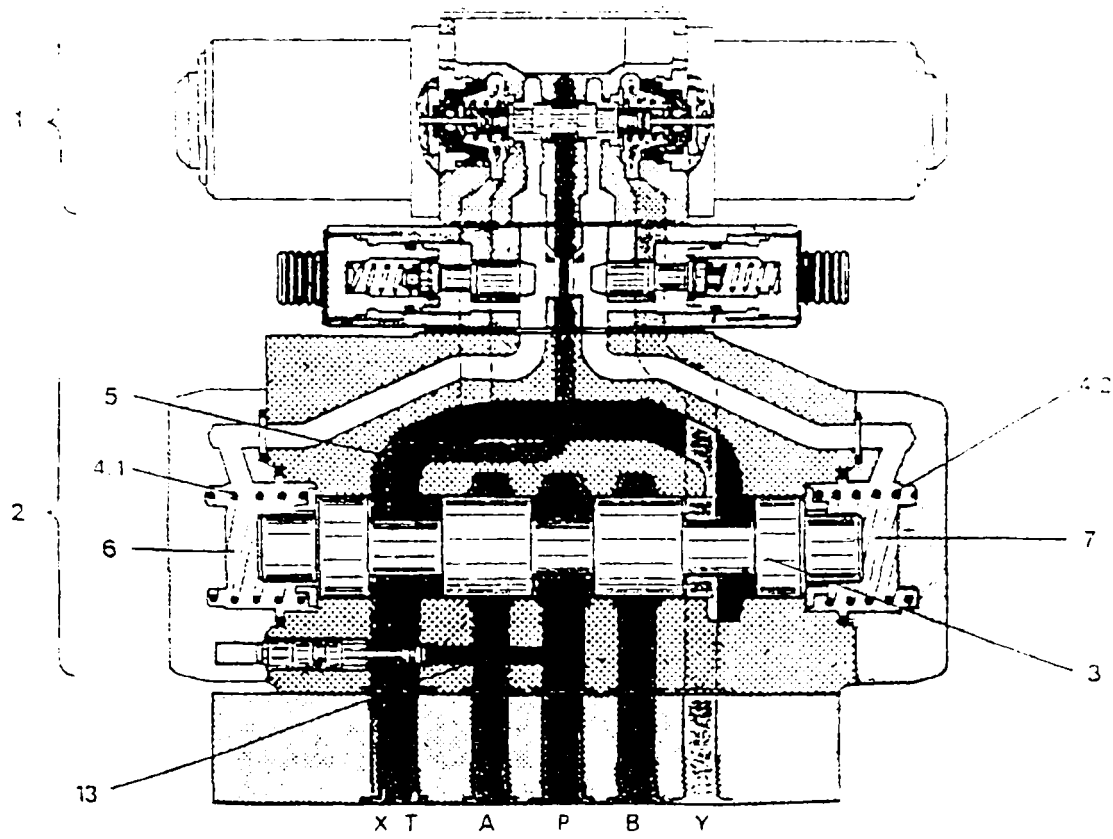


Fig. 183.a. Element de distribuție pilotate electric.

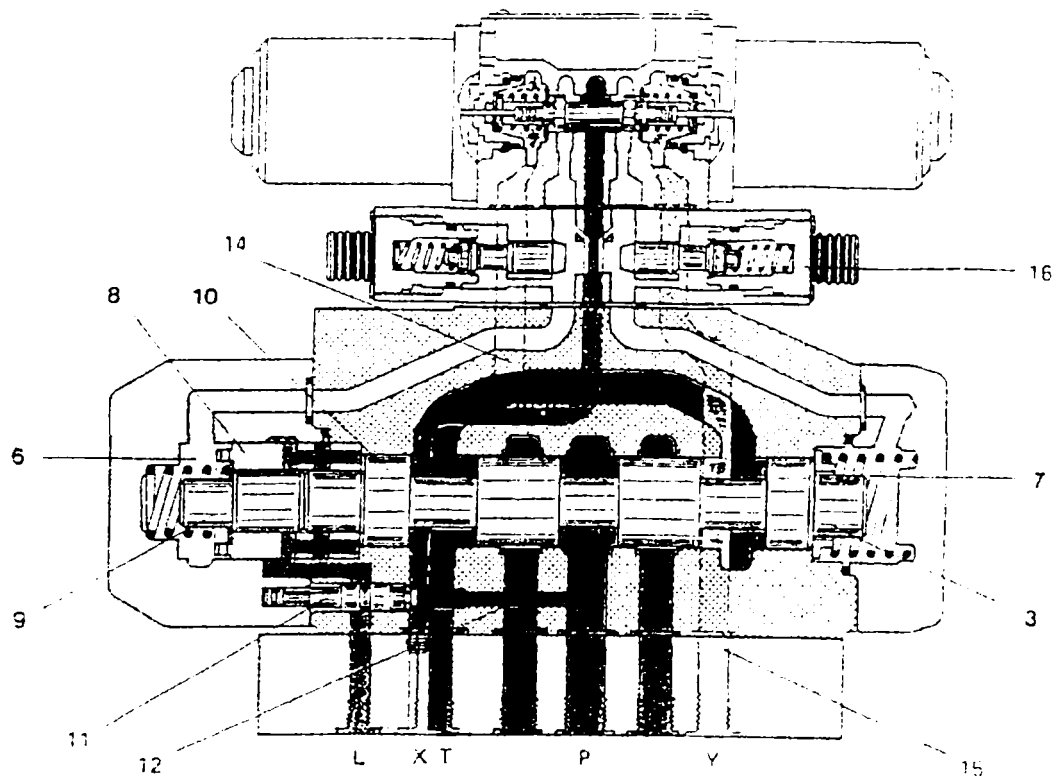


Fig. 183.b. Element de distribuție pilotate hidraulic.

Până pe la începutul deceniului opt au apărut ventile comandate cu electromagneți proporționali, servodistribuitoarele erau singurele echipamente care asigură funcția de proporționalitate.

Servodistribuitoarele folosesc un convertor electro-mecanic în majoritatea cazurilor de tip motor de cuplu și mai rar motorul electro-dinamic, iar în cazuri foarte rare convertori pneumo-mecanici. Servodistribuitoarele se pot realiza cu una, două sau trei trepte de amplificare. Prima treaptă de amplificare hidraulică este în majoritatea cazurilor o combinație de semipunți tip B+B, realizată cu ajutorul rezistenței de tip duză-clapetă. Reacția de poziție pentru sertarul treptei a doua poate fi de tip: barometric, mecanic sau electric. Servosistemul cu comandă, analogică (continuă) utilizând un servodistribuitor două trepte de amplificare este prezentat în figura 184.

Principiu de lucru este următorul: semnalul de comandă sub forma unei trepte de tensiuni U_c intră în convertorul electromecanic cu magnet permanent elementul mobil al acestuia (clapetă) suferind o deviație de la poziția de echilibru

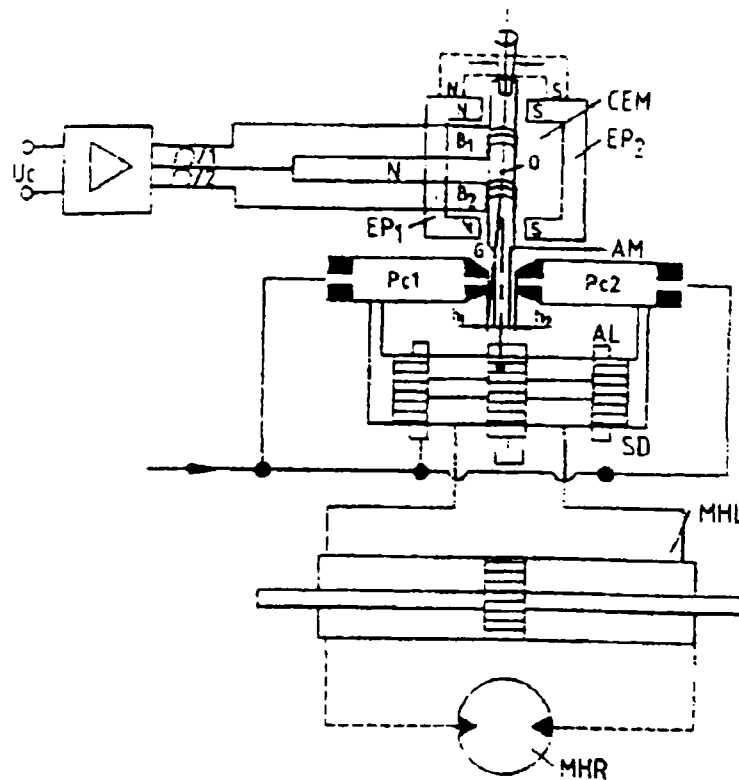


Fig.184 Servosistem electro-hidraulic analogic

static proporțională cu mărimea semnalului de comandă. Prin aceasta se modifică valoarea celor două rezistențe duză-clapetă în sistem diferențial, ceea ce asigură presiuni diferite în camerele de comandă ale sertarului (SD) al servo-valvei, care se pune în mișcare modificând valoarea fantelor de comandă a debitului spre camerele motorului hidraulic (MH). Elementul mobil al motorului se pune în mișcare, deplasarea lui fiind asistată de un traductor de deplasare linear sau rotativ, al cărui semnal este comparat cu cel programat, iar la coincidență tensiunea de comandă U_c se anulează, sistemul intrând din nou în starea de echilibru hidrostatic. Pentru o anumită valoare a tensiunii de comandă U_c armătura mobilă a motorului torsional se rotește cu un unghi θ , cele două rezistențe hidraulice își modifică valorile și prin diferența de presiune $\Delta p = p_{01} - p_{02}$ sertarul distribuitorului se pune în mișcare în sensul anulării rotației armăturii motorului torsional, deplasarea fiind bine determinată, corespunzând unui anumit debit Q spre motorul hidraulic și deci o anumită viteză liniară sau unghiulară a acestuia.

Aparatura de tip servo (servodistribuitoare) se caracterizează prin aceea că mărimea lor de intrare de natură electrică are o mică putere (de ordinul 1/10W), iar mărimea de ieșire este de natură hidraulică (debit și presiune) de ordinul kW.

Specificarea și selectarea servovalvelor este una din problemele cele mai importante ale proiectantului de sistem. Utilizarea lor în acționarea hidraulică a R.I. este dictată de necesitatea acționării asupra parametrilor cinematici (deplasare, viteză, accelerație) și/sau dinamici (forță moment) și a controlului automat al acestor parametrii.

Prin aceasta s-a impus conceptul de reglare care presupune menținerea mărimii de ieșire a sistemului într-o dependență față de o mărime de intrare, sistemul numindu-se " Sistem hidraulic de reglare automată " sau " Servosistem ".

Structura unui astfel de servosistem este prezentat în figura 185.

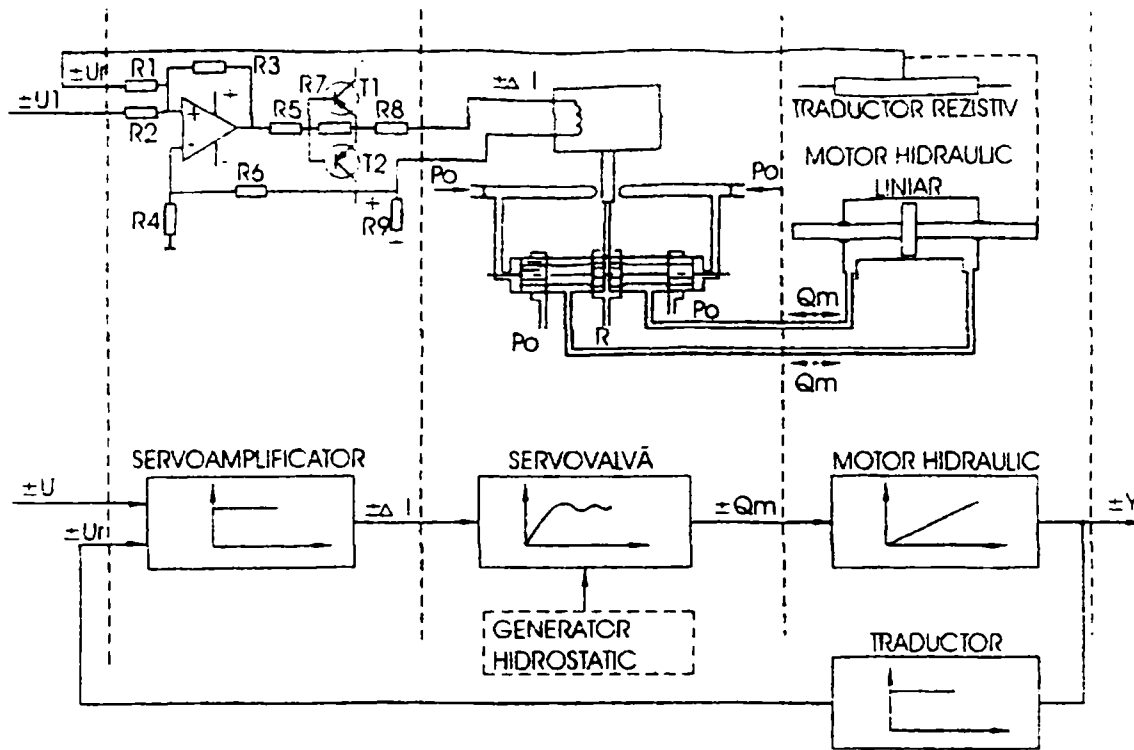


Fig.185 Schema bloc a unui servosistem electrohidraulic.

În figura 186 se prezintă o servovalvă cu o treaptă de amplificare formată din motorul de comandă (1) și amplificatorul hidraulic (2), de tip ajutoraj-clapetă dublu. În figura 186.b. se arată diagramele privind modificarea de presiune funcție de curentul de intrare .

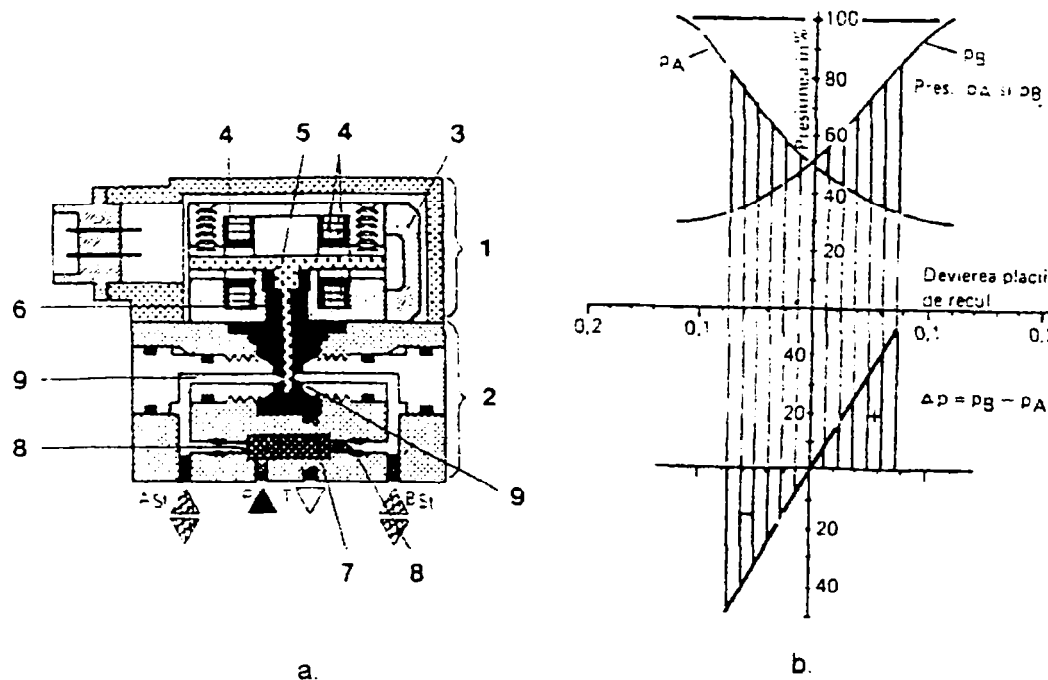


Fig.186. Servovalvă cu o treaptă de amplificare:
a- schema de principiu; b- caracteristici presiune-deplasare clapetă.

Sevoalva a fost realizată și la noi în țară la I.C.S.I.T. M.U. Titan București, Electrotimiș, Timișoara și I.E.H. Râmnicu Vâlcea.

În figura 187. se prezintă o servovalvă cu două trepte de amplificare. Față de schema anterioară s-a adăugat o a doua treaptă de amplificare hidraulică (3) de tip sertăraș.

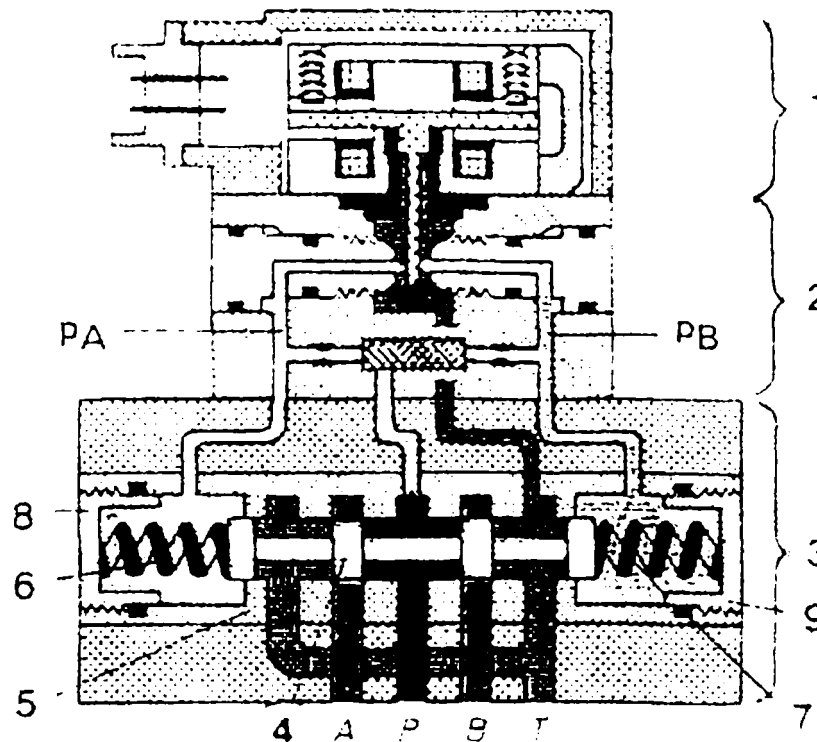


Fig.187 Servovalvă cu două trepte de amplificare, centrare prin arcuri

Motorul de comandă (1) transformă curentul "i" în cursă "s" a clapetei, amplificatorul hidraulic (2) transformă cursa "s" în diferență de presiune Δp , iar amplificatorul hidraulic (3) transformă diferența de presiune Δp în debit Q, care acționează motorul hidraulic.

Centrarea sertărașului (4) se realizează de către arcurile (6) și (7) susținute de capacele (8) și (9).

În figura 188 se prezintă o servovalvă cu trei trepte de amplificare și revenire electrică.

Reacția internă pentru poziționarea sertărașului principal (9) se realizează pe cale electrică, cu ajutorul traductorului de poziție (4). Etajul (1) de amplificare se realizează de către motorul de cuplu (5), clapeta (6) și rezistențele hidraulice ajută-clapetă (7). Etajul (2) de amplificare se realizează de către sertărașul (8). Aceste servovalve se utilizează pentru amplificări mari de putere (debite de până la 3000 l/min)

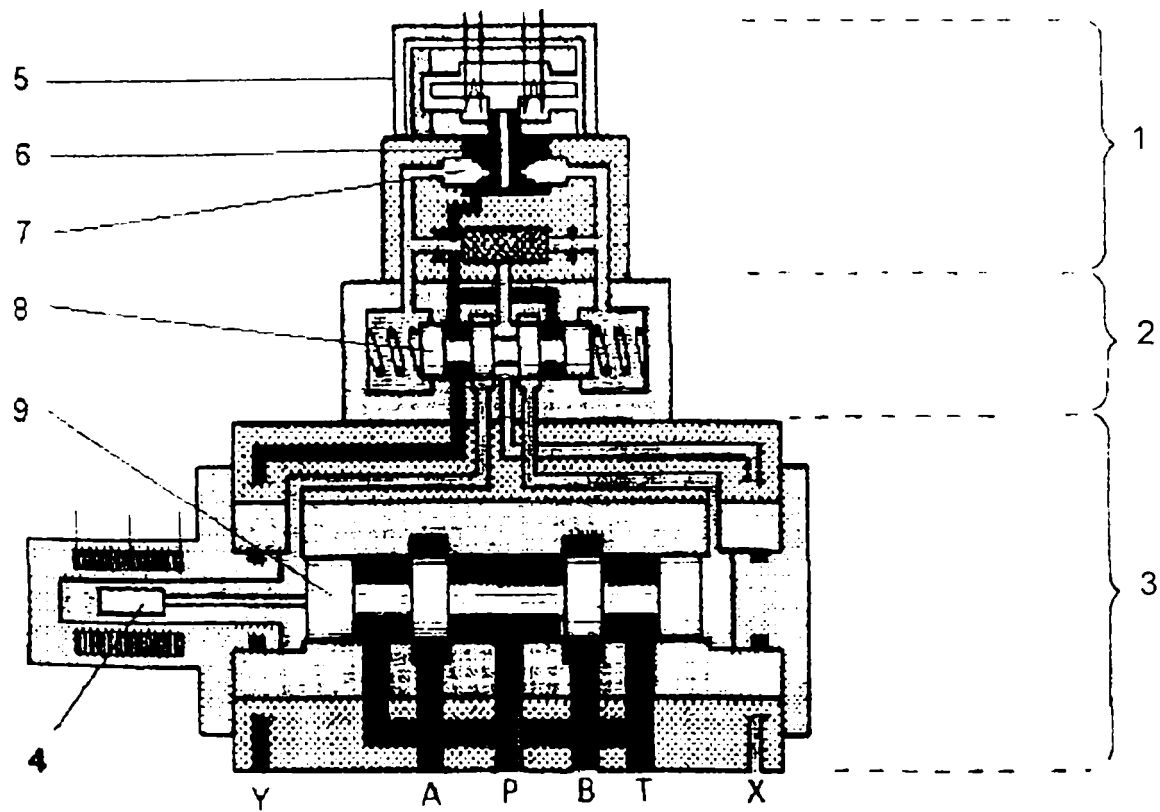


Fig.188 Servovalvă cu trei trepte de amplificare și reacție electrică.

7.2.3.3. Distribuitoare proporționale

Distribuitorii proporționale, prezintă o nouă direcție pe care s-a dezvoltat hidraulica proporțională, eliminând neajunsurile servodistribuitorilor (servovalvelor).

Utilizarea distribuitorului proporțional duce la o însemnată economie de echipamente hidraulice clasice (drosele, distribuitoare de comutație etc.). Prin reglabilitatea după program a variației secțiunilor de droselizare se realizează și controlul variației vitezelor. Convertorul electro-magnetic pentru aceste echipamente este electromagnetul proporțional (E.M.P). Rezistența hidraulică cea mai utilizată este cea cu sertar cilindric. Pentru distribuitoare cu dimensiuni reduse sub Dn10, se realizează acționarea directă, iar pentru distribuitoare cu Dn peste 10mm este necesară pilotarea sertarului principal. Echipamentele proporționale realizează reglarea debitului sau presiunii pe baza unei legi de proporționalitate între mărimea de intrare de tip electric (curent) și mărimea de ieșire de tip hidraulic (debit sau presiune). Utilizarea acestor echipamente permite o mai mare elasticitate în funcționarea instalațiilor deservite ca și obținerea unei precizii mai ridicate, datorită posibilităților de reglare continuă a mărimilor de interes și a creșterii capacității de control și automatizare.

Un tip de distribuitor din variantele Dn6 și Dn10 "cu acțiune directă produs de firma Bosch se prezintă în figura 189.

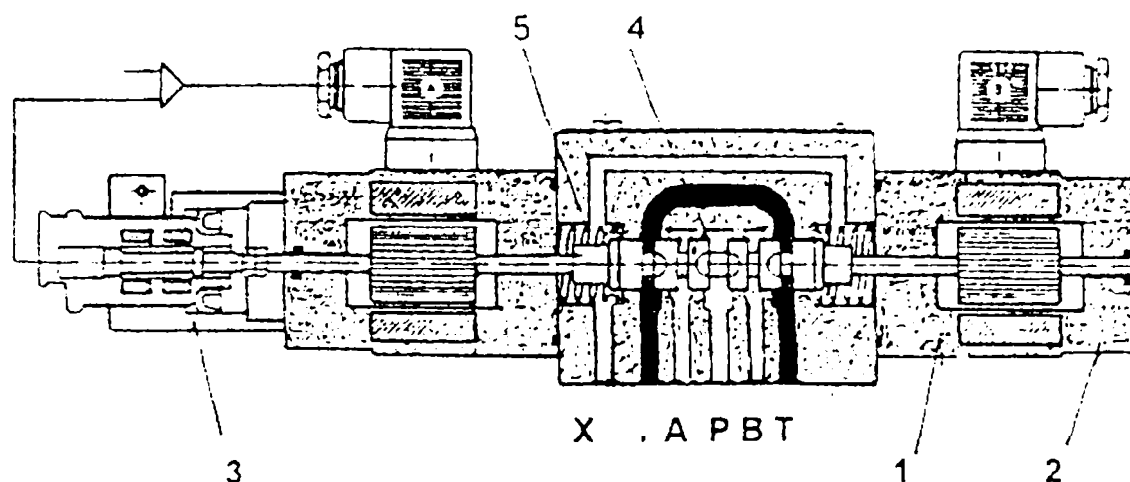


Fig.189. Distribuitor proporțional cu acțiune directă.

Pistonașul (4) este menținut în echilibru de către arcurile (5). Comanda se realizează cu electromagneții proporționali (2), deplasarea fiind urmărită de traductorul de poziție (3). Fiecărei valori a semnalului de comandă a electromagneților îi corespunde o poziție a pistonașului (4), respectiv o anumită secțiune de trecere a uleiului, deci un anumit debit spre cele două camere ale motorului hidraulic.

Pentru debite mari (peste 80-100l/min) se utilizează distribuitoare proporționale pilotate, deoarece se necesită secțiuni de trecere, respectiv deplasări ale sertărașului și forțe de acționare ale acestuia de mărimi corespunzătoare. Comanda directă electromecanică (E.M.) a sertarului distribuitorului în acest caz este neeconomică. Se folosește în acest caz comanda hidraulică cu ajutorul unui ventil proporțional pilotat.

În figura 190 se prezintă un distribuitor proporțional realizat de firma Rexroth.

Pilotarea se realizează de către piloții (1) și (2) , acționați de către electromagneții proporționali (E.M.P.), ce pot modifica diferența de presiune de pe fețele laterale ale pistonașului principal (8) (camerele 10,12), de unde rezultă proporționalitatea curent-debit. Centrarea în poziție mediană se realizează cu un arc unilateral (9). Legătura între piloți (ventilele 1 și 2) se poate realiza mecanic sau electric.

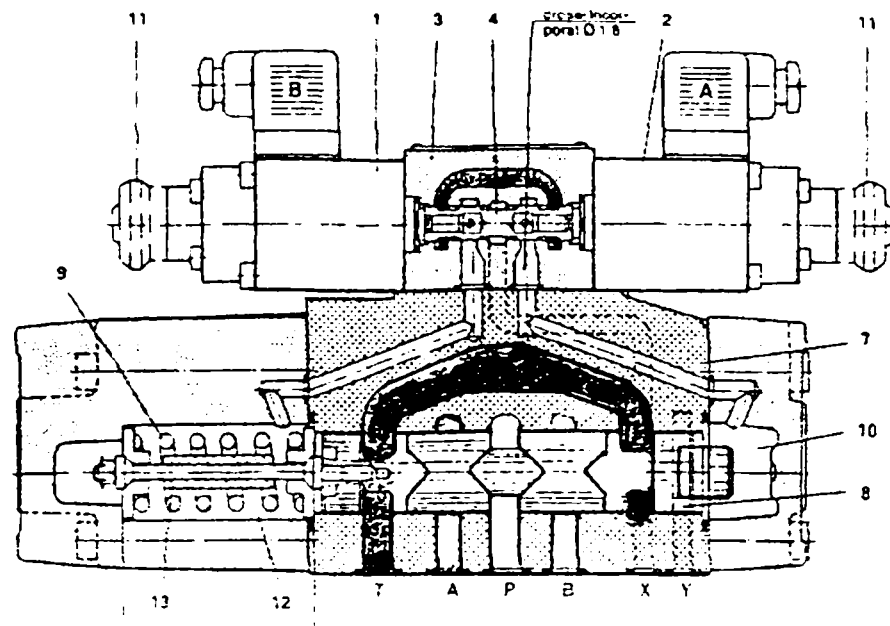


Fig.190 Distribuitor proporțional pilotat produs de firma Rexroth

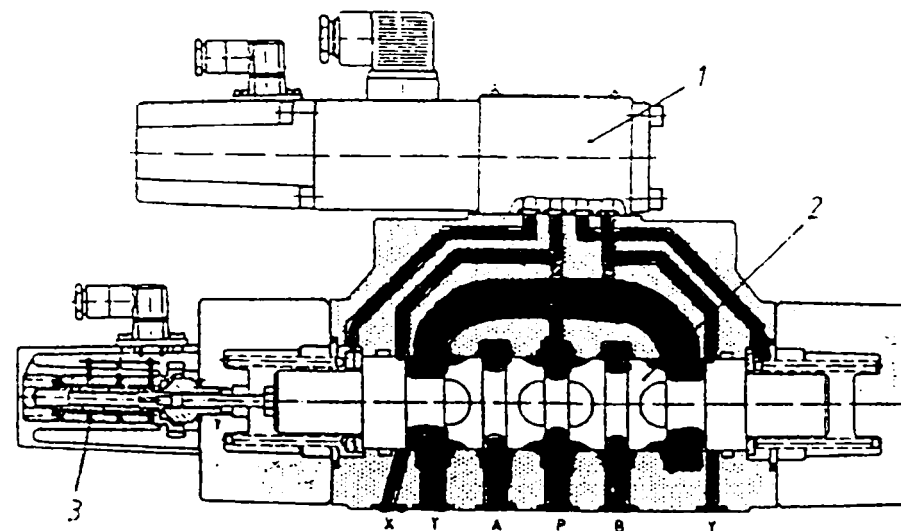


Fig.191.a Distribuitor proporțional pilotat produs de firma Bosch

În figura 191.a. se prezintă un distribuitor proporțional pilotat cu revenire electrică realizat de firma Bosch, iar în figura 191.b caracteristicile de frecvență ale acestui distribuitor cu Dn25.

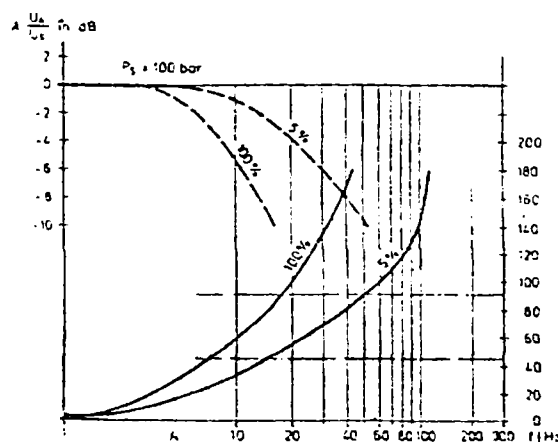


Fig.191.b. Caracteristici de frecvență.

În figura 192 se prezintă un distribuitor proporțional pilotat cu patru căi tip 4WRZ16E..., centrare pe arcurile (10) și (11). În principal este format din carcasa (3), pistonășele de pilotare (4) și (5), magneți proporționali (6) și (7), sertarul principal (9). Aceste distribuitoare sunt realizate cu $D_n = 10 \dots 32$, presiuni de lucru până la 350 bari și debite de tranzit până la 1200 l/min. pentru pornire se necesită un amplificator electronic.

Creșterea performanțelor și a gradului de automatizare a mașinilor și utilajelor necesită din ce în ce mai mult circuite de reglaj automat. Astfel în cadrul roboților industriali se utilizează circuite de reglaj a poziției, a vitezei / rotației. Sarcina unui astfel de circuit este de a menține constante unul sau mai mulți parametri cum sunt poziția, viteza, atunci când variază mărimile perturbatoare. Modul de realizare a acestor performanțe vor fi scoase în evidență prin modelarea și simularea sistemului de reglaj utilizat în cadrul conducerii pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de translație a unui robot.

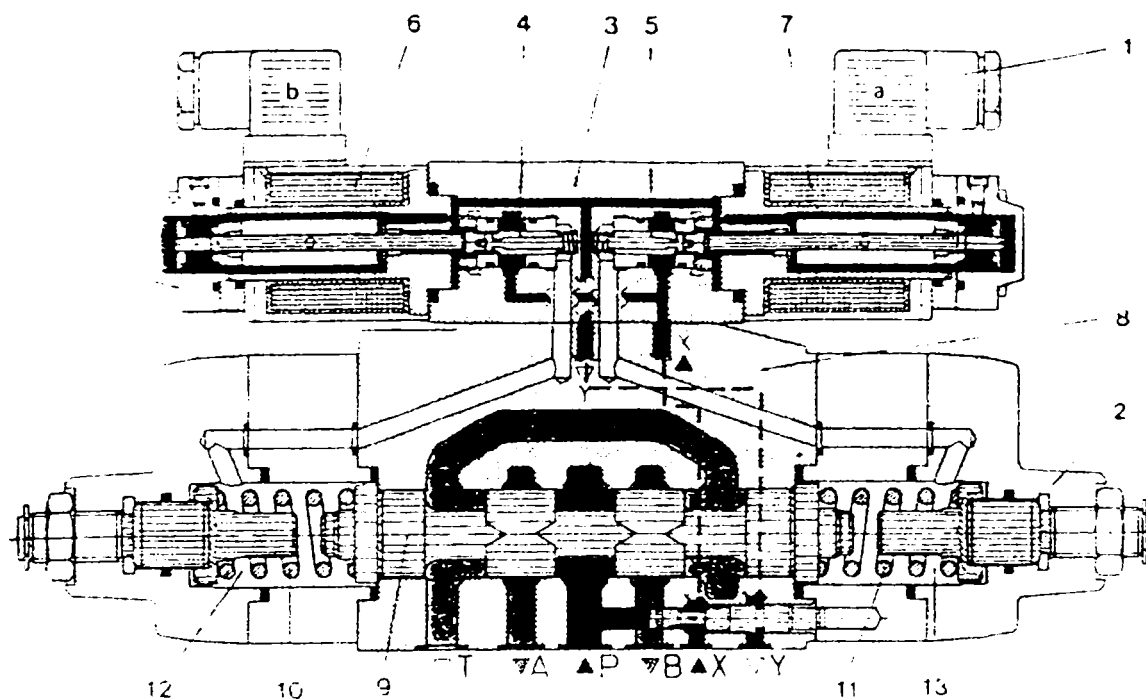


Fig.192 Distribuitor proporțional pilotat produs de firma Rexroth

Elaborarea unei metode de modelare pe calculator a acțiunilor hidraulice și simularea funcționării pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de translație a unui robot.

8.1. Prezentarea dispozitivului de injecție

Sistemul convențional, figura 193 este caracterizat de notabile mase de fluid în mișcare. În momentul opririi bruște a pistonului (datorită umplerii cavității forme de turnare cu aliaj topit) energia cinetică a fluidului și cea a maselor în mișcare, provoacă un vârf de presiune necontrolabil asupra metalului topit.

Valoarea instantanee și ridicată a acestei presiuni asupra metalului încă în stare lichidă poate depăși forța de închidere a utilajului și provoacă o eliminare de aliaj topit din matriță (stropire) prin deschiderea acesteia.

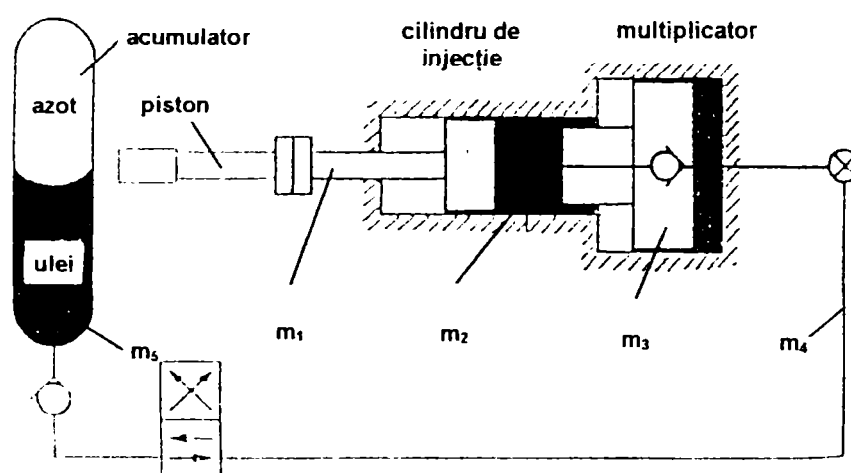


Fig. 193 Dispozitiv de injecție convențional;
 m_1 -masa pistonului; m_2 - masa cilindrului de injecție; m_3 - masa multiplicatorului; m_4 - masa lichidului în mișcare; m_5 - masa lichidului din acumulator

8.2 Prezentarea structurii axei de translație orizontală pentru pistonul mașinii de turnat sub presiune

Axa hidraulică de translație orizontală figura 194 este compusă din motorul hidraulic liniar (MHL) cu dublă acțiune format din cilindrul 1, pistonul 2, tija 3, sistemul de ghidare TG legat de tija 3, prin flanșa 4. Se alege soluția de acționare cu un servosistem electrohidraulic, utilizând un distribuitor proporțional de tip 4WRZ25E325-31/6A24NEZ4/D 2M, produs de firma Rexroth, având schema de principiu prezentată în figura 192 și o interfață de comandă prezentată în figura 195. Pentru urmărirea poziției și vitezei de deplasare, s-a utilizat un traductor de deplasare liniar de tip incremental și o interfață cu calculatorul prezentată în paragraful 196.

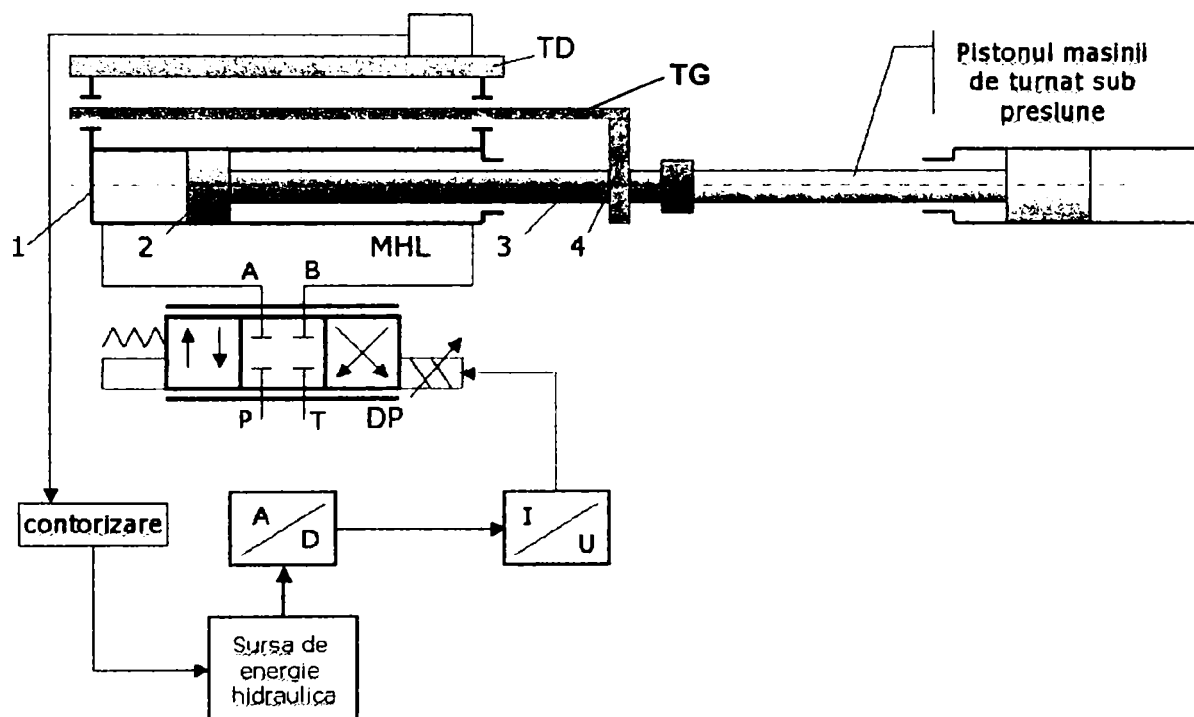


Fig.194 Schema de conducere a pistonului mașinii de turnat sub presiune ca o axă de robot

În această situație controlul deplasării, respectiv cel al vitezei se poate face prin controlul debitului de ulei care se scurge prin distribuitorul proporțional spre motorul hidraulic. Soluția propusă face posibilă conducerea axei de translație prin calculator conform procesului tehnologic de turnare sub presiune.

Schema de conducere se poate realiza în mai multe variante. Conducerea axelor se realizează în general de către dispozitive electronice numite procesoare de axă, existent la nivelul fiecărei axe în parte. Aceste procesoare sunt subordonate generatorului de traiectorie de la care primesc mărimile prescrise. Schema bloc principală este prezentată în figura 195.

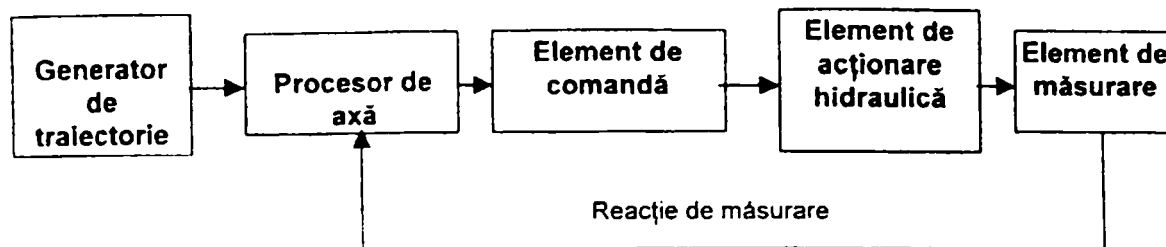


Fig.195.Schema bloc de conducere a unei axe de robot.

Programul îndeplinește următoarele funcții:

- preia de la consolă poziția programată pentru deplasarea axei orizontale;
- preia de la sistemul de măsurare poziția curentă a axei;
- calculează viteza și accelerațiile deplasării din poziția și timpul măsurat;
- calculează valorile impuse ale poziției, vitezei și accelerației;
- calculează erorile dintre mărimile impuse și cele măsurate;
- elaborează pe baza unei legi de reglare mărimile de comandă;
- transmite mărimile de comandă electromagneților distribuitorului hidraulic proporțional.

Având în vedere faptul că elementul acționat este un motor hidraulic liniar ca și traductor de poziție s-a folosit o riglă optică tip LI120.

8.3. Schema de conducere a axei hidraulice de translație

Sistemul este prezentat în figura 196. În cele ce urmează se prezintă elementele componente ale schemei de conducere a axei hidraulice de translație.

1. Calculator PC, care rulează programul de supraveghere al întregului proces. În program se înscriu cotele la care trebuie să se deplaseze punctul caracteristic al pistonului în conformitate cu procesul tehnologic și viteza cu care trebuie să se deplaseze.

2. Cursorul traductorului de poziție, este solidar cu elementele fixe ale sistemului.

3. Rigla traductorului de poziție, se deplasează împreună cu pistonul și generează impulsurile de măsurare corespunzătoare.

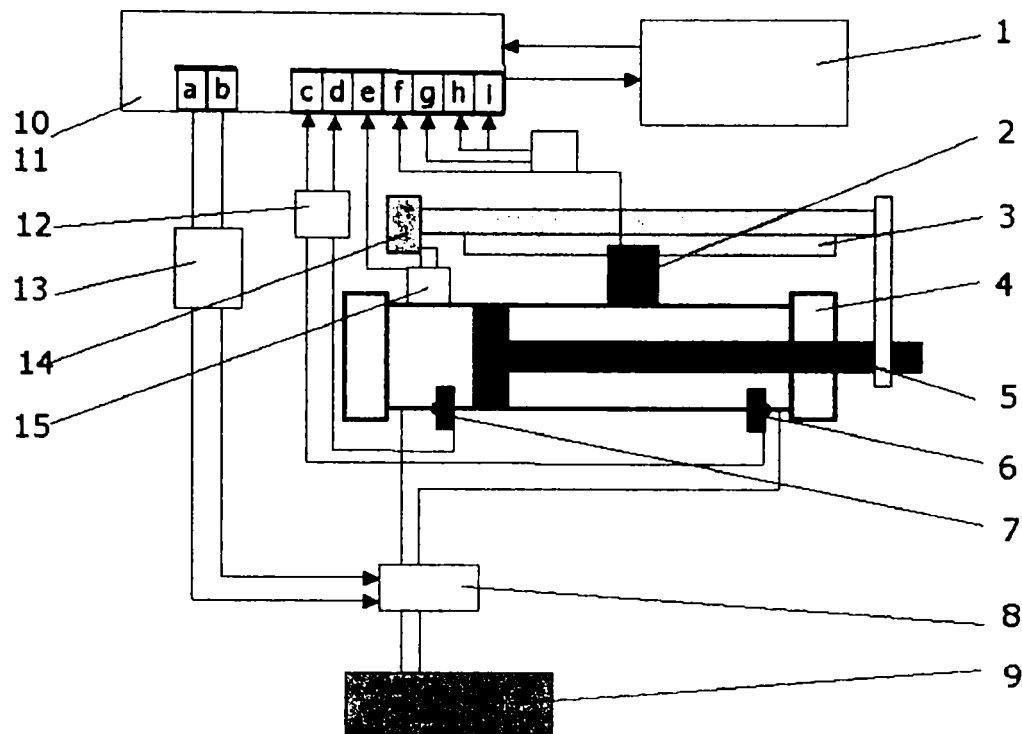


Fig.196 Schema de conducere a axei hidraulice de translație

4. Cilindrul motorului hidraulic linear cu tijă unilaterală.

5. Tijă motorului hidraulic.

6. Traductor de presiune TP1.

7. Traductor de presiune TP2. Cele două traductoare de presiune oferă informații despre presiunea în sistem deci implicit legate de forțele ce acționează asupra pistonului. Traductoarele de presiune pot măsura presiuni de la 0 la 400 bari, cu o precizie de 1 bar și dau un semnal în curent, proporțional cu presiunea, de la 0 la 20mA.

8. Distribuitorul proporțional, reglează viteza pistonului motorului hidraulic în funcție de curentul scurs prin bobinele de comandă, de la 0 la 20mA.

9. Sursa de energie hidraulică, formată din rezervor, pompă acționată de motorul electric, filtru de ulei, supapă de limitare a presiunii.

10. Placa de achiziție (PCI1200), asigură conversia A/D (analog/digital) și D/A (digital /analog) cât și contorizarea semnalelor de măsurare și respectiv de comandă.

11. Circuitul de conversie poziție, realizează transformarea semnalului din formă sinusoidală în TTL (semnal treaptă unitate), și decelerarea sensului de mișcare.

12. Circuit de conversie presiune, realizează transformarea semnalului curent (4-20mA) în semnal tensiune (0-10V).

13. Circuitul interfață de comandă, realizează transformarea semnalului analogic tensiune (0-10V) în semnal curent (0-20mA).

14. Cama de sincronizare, stabilește punctul de nul al sistemului de măsurare.

15. Contactorul de sincronizare, realizează împreună cu cama de sincronizare preluarea punctului de nul al poziționării.

Pe placa de achiziție s-au notat cu litere latine, ieșirile și intrările de la dispozitivele folosite cu următoarea corespondență:

a- DAC0OUT – ieșire analogică de comandă "0".

b- DAC1OUT - ieșire analogică de comandă "1".

c- ACH6- intrare analogică pe canalul 6 de la traductorul de presiune TP1.

d- ACH7- intrare analogică pe canalul 7 de la traductorul de presiune TP2.

e- PC7- intrare digitală de la cotactorul de sincronizare.

f- GATE1 semnal de validare a contorizării pentru contorul C1.

g- GATE2 semnal de validare a contorizării pentru contorul C2.

h- CLKB1-contorizare impulsuri de poziție în sens +

i- CLKB2-contorizare impulsuri de poziție în sens -.

8.4 Subsistemul de măsurare a deplasării relative a elementelor cuplelor cinematice conducătoare (axei). [T3]

Pentru măsurarea deplasării pe axa orizontală s-a utilizat un subsistem de măsurare realizat cu ajutorul unui traductor de deplasare (riglă optică incrementală) de tip LI120 fabricat de firma Opted din Bulgaria. Riglă furnizează 2 semnale sinusoidale denumite în cele ce urmează U1 și U2, defazate între ele cu +/- 90° în funcție de sensul mișcării. Semnalele trec succesiv prin valoarea maximă, respectiv minimă în cursul deplasării liniare.

Pentru calculul valorii numerice a poziției elementelor mobile se utilizează un program înscris în memoria calculatorului PC, care primește valorile necesare calculului, de la placa de achiziție PCI1200. Legătura între rigla optică și placa de achiziție se realizează cu ajutorul unei plăci de interfață care are rolul de a transforma cele 2 semnale sinusoidale U1 și U2 furnizate de rigla optică într-un șir de impulsuri care va fi transmis plăcii PCI1200. schema plăcii de interferență este prezentată în figura 197.

Placa de achiziții contorizează impulsurile CKL pentru a obține valoarea numerică a poziției elementului mobil al axei. Placa de interfață mai furnizează de asemenea încă două semnale: GATEB1 (stânga) cu rol de a activa contorul CLKB1 și respectiv GATEB2 (dreapta) pentru a contoriza impulsurile la deplasări în sens opus activând contorul CLKB2 de pe placa de achiziție.

Placa de interfață conține două comparatoare cu histereză realizate cu ajutorul unui circuit comparator de tip β M339 cu rolul de a transforma semnalele sinusoidale în semnale digitale.

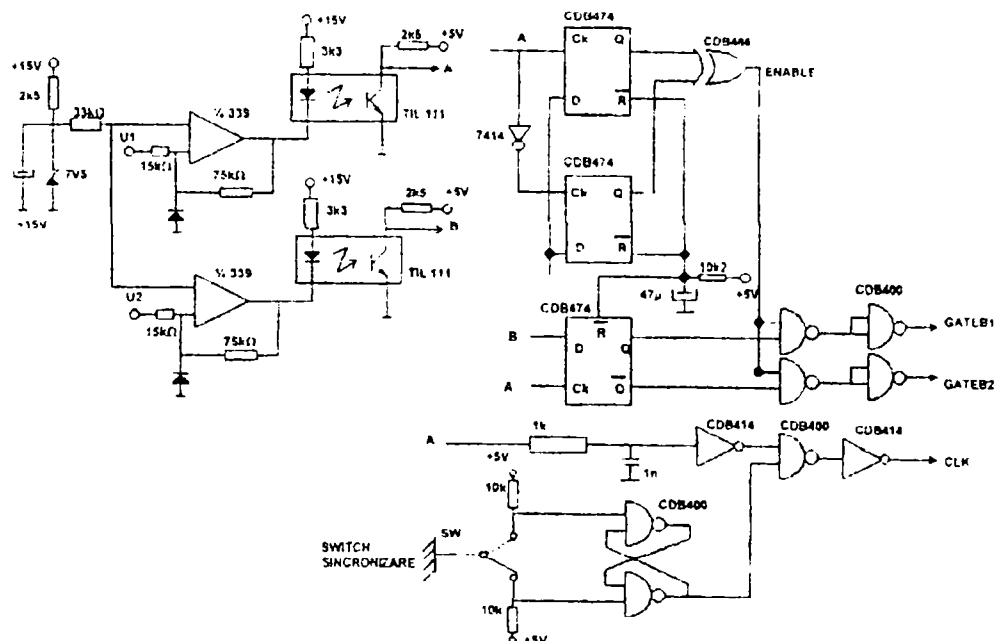


Fig.197 Circuit de interfață de măsurare

Circuitul care dă informații cu privire la sensul deplasării (semnale GATEB1 și GATEB2) este realizat cu un dispozitiv bistabil de tip D urmat de porți de tip "Și NU"

Pentru sincronizarea mișcării axei (preluarea punctului zero al axei), este folosit un switch amplasat pe axă și un circuit bistabil realizat din două porți " Și NU" cu rolul de a elimina oscilațiile ce apar la acționarea switch-ului.

Pentru a realiza o comandă corectă a contoarelor de pe placa de achiziție (CLKAB1 și CLKAB2) impulsurile de numărare sunt întârziate cu un circuit RC.

8.5. Subsistemul de comandă

Electromagneții distribuitorului proporțional sunt comandați în curent având intensitatea în domeniul 0-0.8 A, în timp ce placa de achiziție poate furniza semnale de tensiune între 0-10V. Pentru realizarea acestei comenzi se utilizează o placă de interfață a circuitului de comandă care să realizeze conversia necesară. Schema plăcii de interferență este prezentată în figura 198.

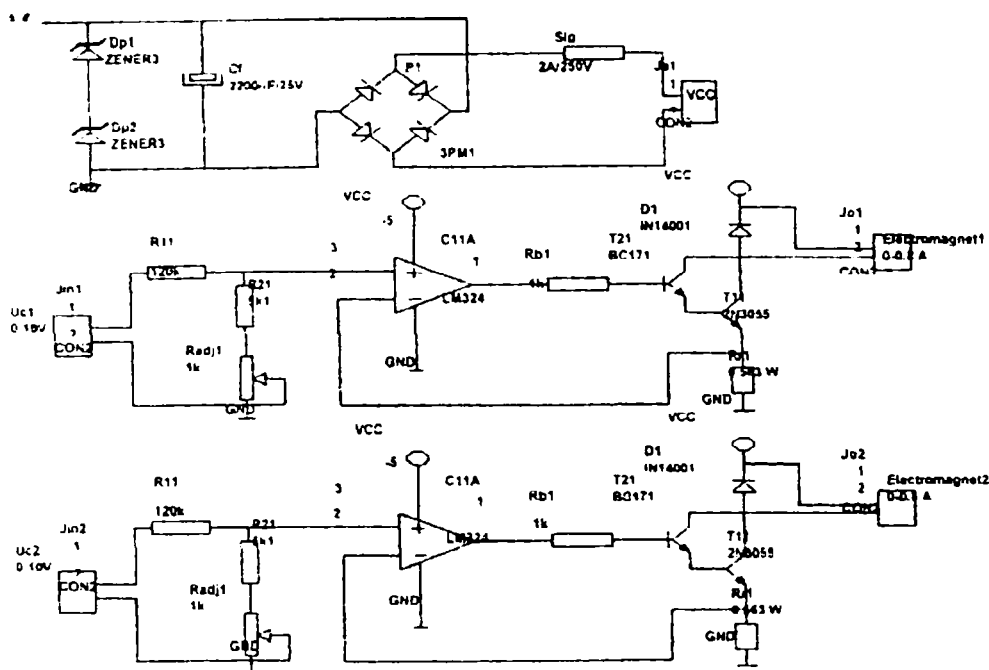


Fig.198 Circuit de interfață de comandă a distribuitorului proporțional

Tensiunile de comandă Uc1 respectiv Uc2 sunt furnizate de către canale de ieșire analogice ale plăcii de achiziție PCI 1200: DAC0OUT și DAC1OUT. Valorile tensiunilor sunt calculate, pe baza legilor de reglare, în cadrul softului de comandă, și sunt generate de către circuitele plăcii de achiziție.

8.6 Subsistemul de contorizare și conversie A/D respectiv D/A

Conversiile A/D (analog/digital) respectiv D/A (digital/analog) sunt realizate de către o placă de achiziție PCI1200, de fabricație Național Instruments, cuplată la magistrala calculatorului PC. Placa de achiziție este dotată cu un set de biblioteci de

funcții dezvoltate pentru programare în limbajul Visual C++ și cu două contoare 82C53 dintre care unul (82C53B) este folosit în scopul contorizării semnalelor primite de la o sursă externă (circuitul de interfață al riglei de măsurare).

Contorul 82C53B poate contoriza două semnale, pe intrările CLKB1 și CLKB2. pornirea și oprirea contoarelor se realizează prin comutarea semnalelor la intrările GATEB1 și GATEB2. caracteristicile de timp ale contoarelor sunt următoarele: durată semnal Clock – 380 ns minim; durată semnal Gate – 100 ns minim.

Al treilea contor B0 al circuitului 82C53B este folosit pentru a furniza baza de timp pentru calculul vitezei în programul de comandă.

Pentru generarea semnalelor de comandă sunt folosite două canale de ieșiri analogice. Tensiunile de ieșire sunt date de un convertor D/A pe 12 biți. Pentru comanda electromagneților distribuitorului proporțional s-a folosit modul unipolar, cu un domeniu de tensiuni de la 0 la 10V. Incrementul de conversie D/A în acest caz va fi de:

$$1LSB = \frac{10V}{4095} = 2,442 \cdot 10^{-4} V$$

ceea ce asigură o precizie corespunzătoare (LSB = Least significant bit).

8.7 Modelarea matematică a acționărilor hidraulice ale cuplelor cinematice conducătoare ale roboților industriali.

8.7.1 Introducere

Scopul modelării matematice este stabilirea ecuațiilor matematice care descriu legătura dintre mărimea de ieșire (unghiul de rotație, deplasare, forță) și mărimile de intrare (tensiune, curent, deplasare), din respectiv în servosistemul de acționare.

Indiferent de tipul acționării (electric, hidraulic, pneumatic, electro-hidraulic), oricare modul al robotului (R sau T) are în componența sa un servosistem format din elementul de distribuție sau comandă, motorul de acționare și elementul de execuție (organul de execuție).

Pe baza modelării matematice s-a realizat simularea comportării dinamice a servosistemului de acționare.

În cadrul comenzii hidraulice secvențiale elementul central este distribuitorul clasic bazat pe principiul " totul sau nimic " sau tehnica " alb – negru ". În cadrul

sistemului servocomandat analogic, elementul central îl constituie servovalva electrohidraulică sau distribuitorul proporțional, iar în cazul sistemului servocomandat digital, elementul central îl constituie motorul electric pas cu pas (MPP) cuplat cu un amplificator hidraulic.

8.7.2 Etapele modelării matematice a acționării axelor hidraulice

Pe baza schemei de principiu a acționării, a fluxului de energie, a forțelor și momentelor care apar se stabilesc de la caz la caz:

- ecuațiile de continuitate a fluxurilor energetice;
- ecuațiile de echilibru dinamic ale sistemului mecanic;
- funcția de transfer, prin aplicarea transformatei Laplace sau Fourier;
- schema bloc.

8.7.3. Modelul matematic al servosistemului electro-hidraulic cu comandă analogică

Elementul central al servosistemului este distribuția de tip proporțional (servovalvă, sau distribuitor proporțional), cuplată cu motorul hidraulic liniar, sau rotativ.

Srvovalva electro-hidraulică (SVEH) sau distribuitorul proporțional (DP), formează elementul de amplificare, care amplifică mărimea de intrare (I, u, y) în debit de ieșire din amplificator, care este preluat de motorul hidraulic.

S-a stabilit un model matematic generalizat, pornind de la schema din figura 199 al servosistemelor electro-hidraulice analogice, ținând cont de diversele tipuri de amplificatoare (cu clapetă, cu sertar, într-un etaj, sau mai multe etaje de amplificare, cu acoperire negativă sau pozitivă, cu două muchii active, sau patru muchii active, cu sau fără reacție suplimentară de presiune)

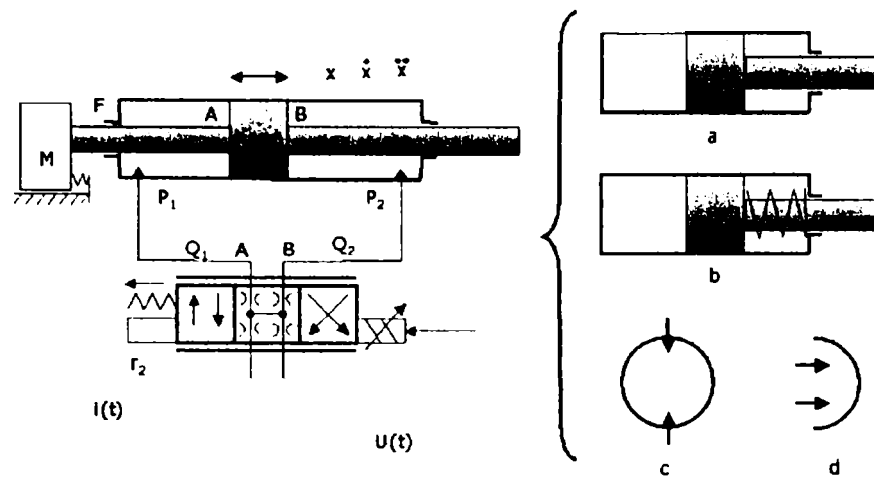


Fig.199 Schema acționării electro-hidraulice generalizate

În acest scop s-au exprimat relațiile privind:

- echilibrul de mișcare al sertarului distribuitorului proporțional;
- ecuația de curgere prin distribuitor;
- conservarea debitului;
- echilibrul de mișcare al organului de execuție.

S-au utilizat următoarele notații:

- A, B – ariile fețelor active ale pistonului motorului;
- p_0 – presiunea de alimentare a sistemului [N/mm^2];
- p_1, p_2 – presiunile în cele două camere ale motorului [N/mm^2];
- y – deplasarea sertarului distribuitorului [m];
- m_1 – masa sertarului servovalvei [kg];
- $i(t)$ – curentul de alimentare al distribuitorului [A];
- M – masa pistonului motorului liniar [kg];
- V – volumul de lucru al motorului [m^3];
- E – modulul de elasticitate inițial al agentului hidraulic [N/m^2];
- c – coeficient de frecare vâscoasă [Ns/m];
- x, \dot{x}, \ddot{x} – cursa, viteza, respectiv accelerația pistonului [m, m/s, m/s^2];
- C_i – panta caracteristicii distribuitorului;
- q_m – debit specific [cm^3/rot];
- q_{sc} – coeficient de pierderi ($q_{sc}=q_i-q_e/2$);

- q_1 – coeficient de pierderi interioare;
- q_e - coeficient de pierderi spre exterior;
- $\Delta p_m = p_1 - p_2$ – diferența de presiune între camerele motorului [N/m^2];
- K_l – coeficient de pierderi la distribuitor [m^5/Ns];
- A_Q – amplificarea în debit în raport cu deplasarea y a sertarului distribuitorului;
- F - forța dezvoltată de motor [N];
- τ_l - forța externă de rezistență [N];
- Q_r – debit real [m^3/s];
- Q_t – debit teoretic [m^3/s];
- ω_m - frecvența unghiulară de rotație.

Modelul matematic al servosistemului electro-hidraulic analogic cu motor liniar [B4] [D1] [D2] [D3] [M7] [M8] [O4] [T 3]

Pe baza figurii 199 se pot scrie următoarele relații:

- Ecuația de debite la amplificator în regim dinamic:

$$Q_r = A \cdot \dot{x} + q_{sc} \cdot \Delta p_m + \frac{V}{4E} \cdot \Delta \dot{p}_m \quad (230)$$

- Ecuația de echilibru a forțelor la sarcină:

$$F = A \cdot \Delta p_m = M \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + \tau_l \quad (231)$$

- Ecuația de debit a amplificatorului în regim static:

$$Q_r = A_Q \cdot y - k_l \cdot \Delta p_m \quad (232)$$

- Debitul teoretic la motorul hidraulic

$$Q_t = A_Q \cdot y(t) \quad (233)$$

$$A_Q = \alpha_k \cdot a \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_0 - \Delta p_m) M} \quad (234)$$

A_Q -este amplificarea de debit a amplificatorului hidraulic și $a = 2\pi d_s$ - gradient de arie al sertarului distribuitorului.

Ecuațiile modelului dinamic se pot scrie sub forma:

din (231) rezultă:

$$A \cdot \Delta p_m = M \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + \tau_l \quad (235)$$

din (230) și (232) rezultă:

$$A_Q \cdot y(t) = A \cdot \dot{x}(t) + (q_{sc} + k_l) \cdot \Delta p_m + \frac{V}{4E} \cdot \Delta \dot{p}_m \quad (236)$$

Aplicând relațiilor (235); (236) și (232) transformata Laplace, se obține:

$$A \Delta p_m(s) - \frac{\tau_l}{s} = (M \cdot s^2 + c \cdot s) \cdot x(s) \quad (237)$$

$$A_Q \cdot y(s) - A s x(s) = (q_{sc} + k_l) \cdot \Delta p_m(s) + \frac{V}{4E} \cdot \Delta \dot{p}_m \quad (238)$$

$$Q_r = A_Q \cdot y(s) - k_l \cdot \Delta p_m(s) \quad (239)$$

Pe baza relațiilor (237) (238) și (239) se deduce schema bloc a sistemului prezentată în figura 200.

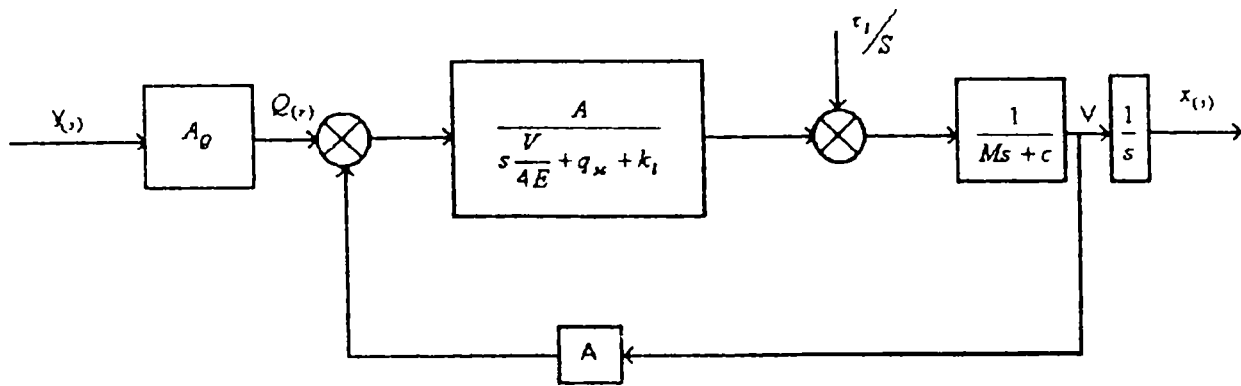


Fig.200 Schema bloc a servosistemului electro-hidraulic cu motor liniar

Pentru deducerea funcției de transfer se explicitează $x(s)$ din relațiile (237) și (238) și rezultă:

$$\Delta p_m(s) = \left(\frac{M}{A} \cdot s^2 + \frac{c}{A} \cdot s \right) x(s) + \frac{\tau_l}{A s} \quad (240)$$

$$\Delta \dot{p}_m = \left(\frac{M}{A} \cdot s^3 + \frac{c}{A} \cdot s^2 \right) x(s) \quad (241)$$

Înlocuind în (238) rezultă:

$$A_Q y(s) = \left\{ \frac{M}{4E} \cdot \frac{V}{A} \cdot s^3 + \left[\frac{cV}{4EA} + (q_{sc} + k_l) \frac{M}{A} \right] \cdot s^2 + \left[A + (q_{sc} + k_l) \cdot \frac{c}{A} \right] \cdot s \right\} x(s) + (q_{sc} + k_l) \frac{\tau_l}{A} \quad (242)$$

$$x(s) = \frac{A_Q y(s) - (q_{sc} + k_l) \frac{\tau_l(s)}{A}}{\frac{MV}{4EA} s^3 + \left[\frac{cV}{4EA} + (q_{sc} + k_l) \frac{M}{A} \right] s^2 + \left[A + (q_{sc} + k_l) \frac{c}{A} \right] s} \quad (243)$$

$$x(s) = \frac{\frac{A_Q}{A} y(s) - (q_{sc} + k_l) \frac{\tau_l(s)}{A^2}}{s \left\{ \frac{MV}{4EA^2} s^2 + \left[\frac{cV}{4EA^2} + (q_{sc} + k_l) \frac{M}{A^2} \right] s + \left[1 + (q_{sc} + k_l) \frac{c}{A^2} \right] \right\}} \quad (244)$$

$$\text{Notând : } \frac{MV}{4EA^2} = \frac{1}{\omega_n^2} \text{ se obține: } \omega_n = \sqrt{\frac{4EA^2}{MV}} = 2A \sqrt{\frac{E}{MV}} \quad (245)$$

$\omega_n = 2A \sqrt{\frac{E}{MV}}$ reprezintă frecvența naturală.

Raportul de amortizare este:

$$\delta = \frac{q_{sc} + k_l}{A} \sqrt{\frac{EM}{V}} + \frac{c}{4A} \sqrt{\frac{V}{EM}} \quad (246)$$

Înlocuind (245) și (246) în (244) se obține:

$$x(s) = \frac{\frac{A_Q}{A} y(s) - (q_{sc} + k_l) \frac{\tau_l(s)}{A^2}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\delta}{\omega_n} s + 1 \right)} \quad (247)$$

8.8. Stabilirea funcțiilor de transfer ale subsistemelor axei de translație

Pentru simularea funcționării modelului matematic stabilit anterior în conformitate cu schema fizică din figura 196 este necesară stabilirea funcțiilor de transfer pentru fiecare componentă a sistemului.

Schema bloc a axei hidraulice de translație este prezentată în figura 201

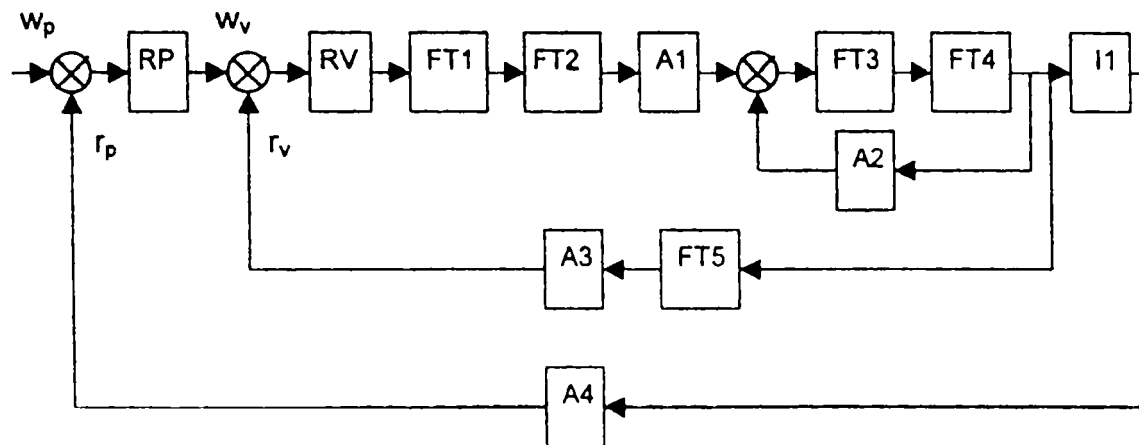


Fig.201 Schema bloc a axei hidraulice de translație

Reglarea funcționării axei hidraulice de translație în modelul prezentat în figura 201. este realizată de către regulatorul de poziție (RP) și respectiv regulatorul de viteză (RV). Aceste regulatoare au o structură proporțional, integrator, derivativ (P.I.D.), calculul parametrilor funcției de transfer al lor fiind expus în paragraful următor. În continuare se va prezenta definirea elementelor componente (subsistemelor) ale sistemului din figura 201.

a) Funcția de transfer FT1; modelează comportarea plăcii de interfață a circuitului de comandă care realizează transformarea mărimii comandă tensiune în mărime de comandă curent. Potrivit literaturii de specialitate [B8] [H11] funcția de transfer se scrie sub forma:

$$FT1(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{R}}{T_c s + 1} \quad (248)$$

în care:

$$T_c = \frac{L}{R} \quad (249)$$

Înlocuind valorile reale pe baza cărora s-a proiectat și realizat interfața de comandă în expresia (248) se obține:

$$FT1(s) = \frac{0.1}{s+1} \quad (250)$$

unde:

$I(s)$ este mărimea de ieșire din placa de comandă, (intensitatea curentului);

$U(s)$ este mărimea de intrare de la placa de achiziții (tensiune de comandă = 0-10V)

R este rezistența, L este inductanța circuitului, s este variabila complexă.

b) Funcția de transfer FT2; modelează comportarea dispozitivului de transformare a semnalului electric de curent în deplasarea sertarului distribuitorului proporțional.

După [B8] relația se scrie:

$$FT_2 = \frac{Y(s)}{I(s)} = \frac{A_{IT}}{T_{r2}^2 s^2 + T_{r1} s + 1} \quad (251)$$

unde:

$Y(s)$ este mărimea de ieșire;

$I(s)$ este mărimea de intrare.

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{T_{r1}}{T_{r2}} \quad (252)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{T_{r2}} \quad (253)$$

În relațiile de mai sus:

$A_{IT} = 785.398$ factorul de amplificare pentru distribuitorul proporțional (din curent în deplasare);

$\delta = 0.4$ factorul de amortizare al sistemului;

ω_0 frecvența proprie a sistemului.

Din relația (253) rezultă:

$$T_{r2} = \frac{1}{\omega_0} \quad (254)$$

unde T_{r2} este timpul de întârziere al distribuitorului proporțional.

Frecvență proprie pentru distribuitorul proporțional se poate considera $f_0=10\text{Hz}$,

unde $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi 10$ [rad/s], deci $T_{r2} = \frac{1}{2\pi 10}$ [s].

Din relația (252) se deduce $T_{\gamma 1} = \frac{\delta}{10\pi}$ [s], timpul de întârziere al semnalului electric.

Înlocuind în relația (251) se obține funcția de transfer FT2:

$$FT2 = \frac{785.398 \cdot 10 \cdot \pi}{0.25s^2 + 0.4s + 31.415} \quad (255)$$

c) Elementele A1,A2 precum și funcțiile de transfer FT3 și FT4 caracterizează funcționarea subsistemului descris în paragraful 8.7 figura 200. Înlocuind valorile concrete ale modelului studiat se obțin pentru elementele amintite următoarele expresii:

$$A1 = 1.36$$

$$A2 = 2.41 \cdot 10^{-3};$$

reprezintă factorii de amplificare .

$$FT3 = \frac{0.00241}{7.85 \cdot 10^{-14}s + 162 \cdot 10^{-12}} \quad (256)$$

$$FT4 = \frac{1}{52.22s + 800} \quad (257)$$

d) Elementul I1 este un element integrator utilizat pentru obținerea mărimii de deplasare din mărimea viteză. Acest element are funcția de transfer:

$$I1 = \frac{1}{s} \quad (258)$$

e) Elementele A3, A4 și FT5 modelează comportarea elementului de măsurare (a riglei optice). Ele sunt exprimate prin următoarele relații:

$$A3 = 1;$$

$$A4 = 1$$

Care reprezintă factorii de amplificare între deplasarea riglei optice și deplasarea pistonului motorului hidraulic (cele două elemente se deplasează concomitent cu aceeași mărime).

$$FT5 = e^{-sT} \quad (259)$$

în care $T = 0.01$ [s] [B8]

Deoarece în scopul simulării se folosesc în marea majoritate a cazurilor funcții raționale, expresia (259), s-a dezvoltat, folosind metoda Pade, cu o expresie rațională obținându-se [M9]:

$$FT5 = e^{-s \frac{10}{s}} = \frac{-200s + 60000}{s^2 + 400s + 60000} \quad (260)$$

8.9. Simularea conducerii axei hidraulice de translație

Simularea are rolul de a verifica corectitudinea modelului stabilit și determinarea unor parametri ai modelului, pentru a asigura o funcționare optimă.

Modelul de simulare al axei de translație considerate s-a întocmit folosind elementele componente prezentate în paragraful anterior.

Pentru simularea axei de translație cu acționare hidraulică s-au folosit două modele.

Primul model întocmit este fără utilizarea reguletoarelor.

Modelul de simulare s-a realizat conform schemelor de simulare ale programului SIMULINK (MATLAB 5.1) [M9] . Cu ajutorul lor s-a simulat funcționarea sistemului folosind metoda de integrare " ode 45 ", care este o variantă optimizată a metodei Runge – Kuta. În cadrul modelului s-au inclus și module grafice " Scope ", cât și un generator de semnale treaptă " Step " .

Modelul de simulare fără reguletoare este prezentat în figura 202.

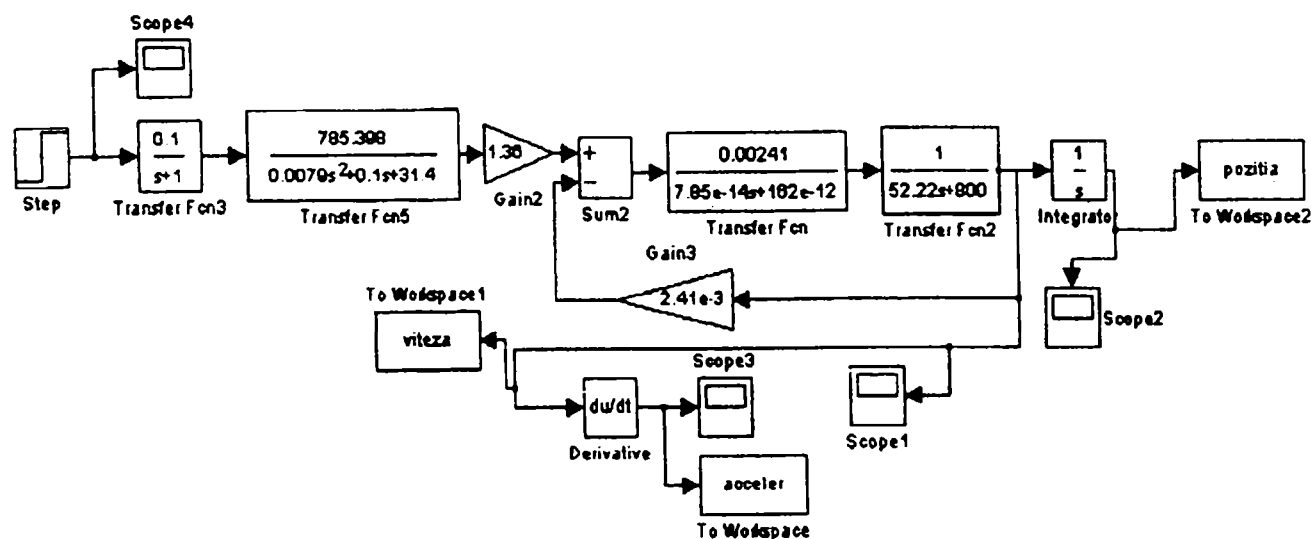


Fig.202. Modelul axei de translație hidraulică – fără reguletoare

Prin diverse încercări, în urma simulării în acest caz s-au obținut diagramele de variație în funcție de timp, respectiv diagramele de variație ale deplasării în funcție de timp (fig. 203, fig. 204, fig. 205), toate pentru semnalul treaptă unitate.

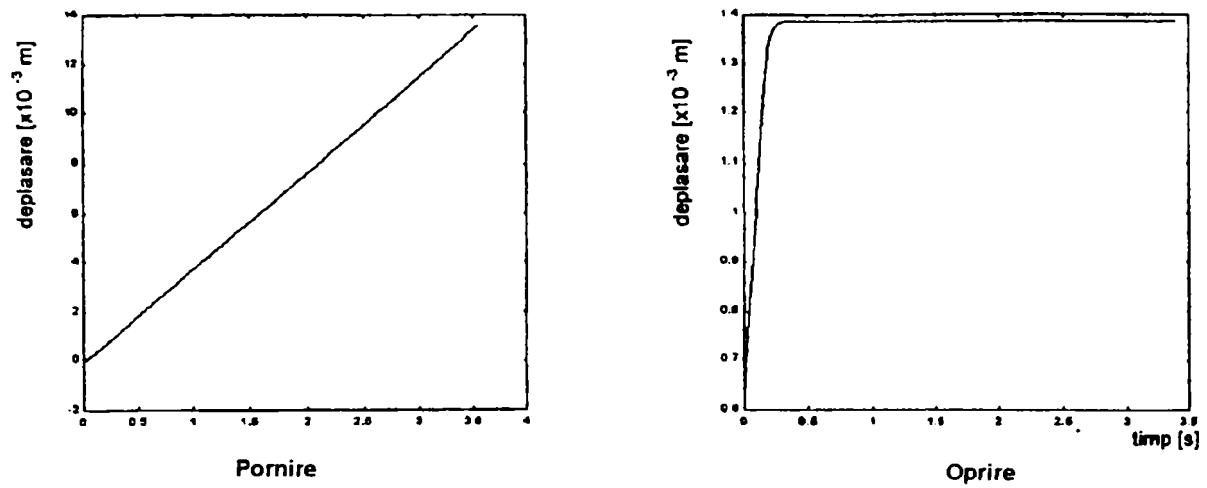


Fig. 203 Diagrama variației în timp a deplasării elementului mobil a axei de translație, comandate fără regulatoare

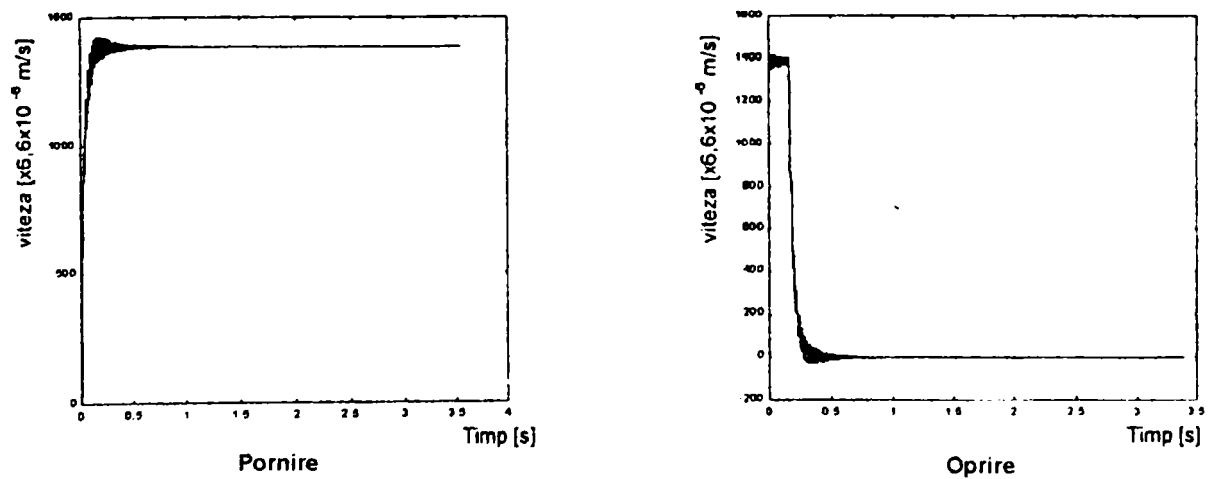


Fig. 204 Diagrama variației în timp a vitezelor elementului mobil a axei de translație, comandate fără regulatoare (coeficient de corecție 6.6×10^{-6})

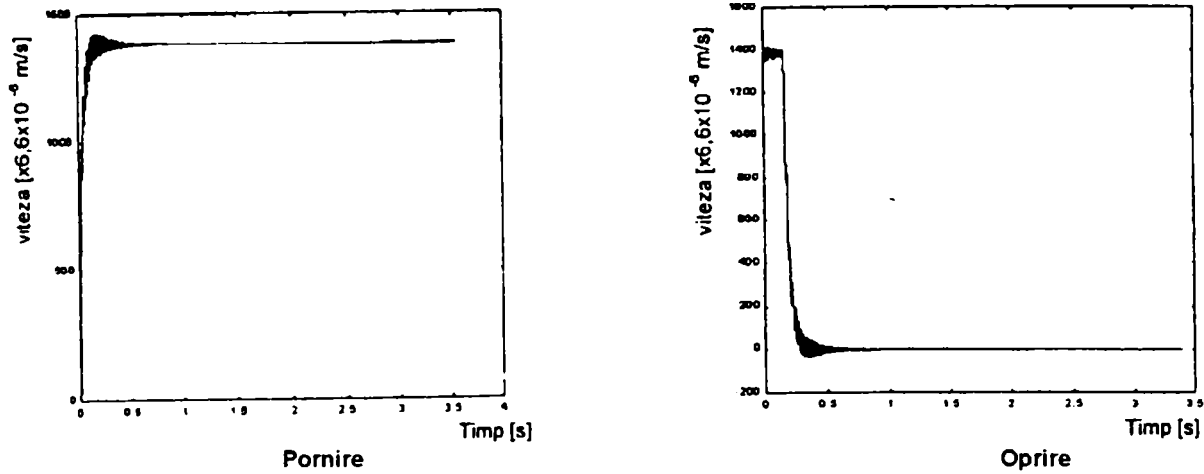


Fig. 205 Diagrama variației în timp a accelerațiilor elementului mobil a axei de translație, comandate fără reglatoare (coeficient de corecție 6.6×10^{-6})

Al doilea model de simulare al axei de translație hidraulică s-a întocmit cu aceleași elemente componente la care s-a adăugat și reglator.

Modelul de simulare cu reglator este prezentat în figura 206 și s-a realizat de asemeni conform schemelor de simulare ale programului SIMULINK (MATLAB 5.1).

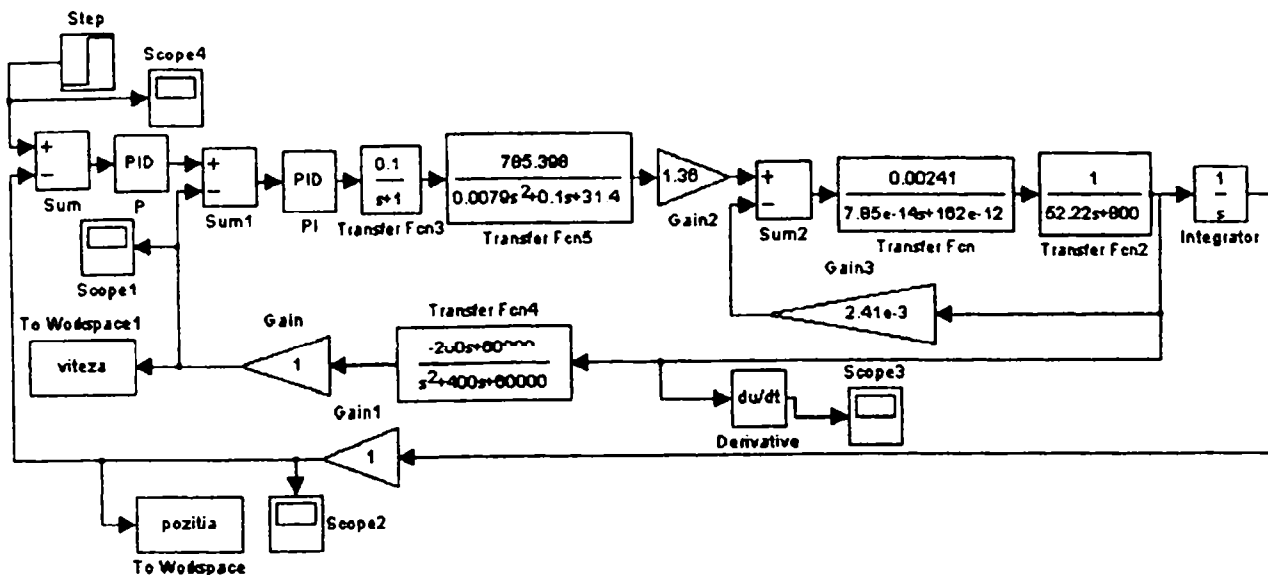


Fig.206 Modelul axei de translație hidraulică – cu reglatoare

Pentru efectuarea simulării s-a folosit combinația proporțional, integrator – proporțional (PI-P) de reglatoare pentru bucla de viteză, respectiv pentru bucla de poziție (viteză-poziție).

În urma simulării efectuate s-au obținut diagramele de variație în funcție de timp, respectiv diagramele de variație ale deplasării în funcție de timp fig. 207 pentru semnal treaptă unitate.

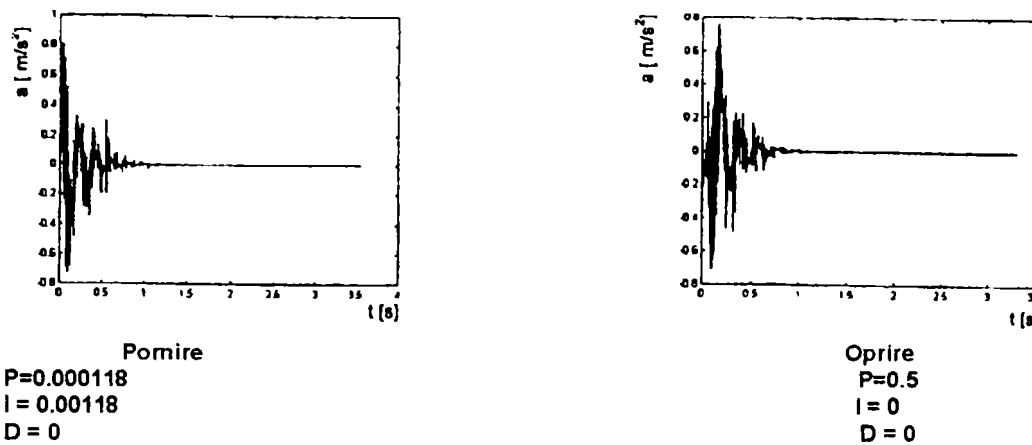


Fig. 207 Diagrama variației în timp a accelerațiilor elementului mobil a axei de translație, comandă cu reglatoare PI-P după direcția axei y- nefiltrate

Analizând diagrama obținută în urma simulării prin combinarea diferitelor tipuri de reglatoare se constată următoarele:

- pentru combinarea PI-P (fig. 207, 207a), se constată o precizie de poziționare < 0.5 mm, precizie admisibilă la majoritatea roboților fabricați, ceea ce reprezintă o funcționare corectă a sistemului, combinație ce se recomandă a fi utilizată pentru reglarea vitezei, respectiv a poziției în cadrul axelor de translație a roboților cu acționare hidraulică, ceea ce recomandă și majoritatea literaturii de specialitate din domeniul acționărilor hidraulice. [D2] [O4]

Simulările descrise mai sus au demonstrat valabilitatea modelului folosit. El stă la baza proiectării sistemului de reglare automată a conducerii mișcării pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și a unei axe de translație orizontală a unui robot.

În concluzie, în urma simulării și interpretării rezultatelor simulării se propune pentru reglajul vitezei, respectiv al poziției combinațiile de reglatoare (viteză – poziție) de tip PI-P .

Studiul diverșilor factori asupra curgerii aliajului topit în cavitatea matriței în cazul turnării sub presiune.

9.1 Studiul influenței poziției și formei geometrice a canalelor și a secțiunii de alimentare.

În cazul turnării sub presiune amplasarea rețelei de alimentare cu aliaj topit a cavității forme se poate realiza în următoarele moduri:

- Rețea amplasată în întregime în aceeași semimatriță în care se găsește amplasată și cavitatea amprentă fig.208.a;
- Rețea amplasată în întregime în semimatrița în care nu se găsește amplasată cavitatea amprentă fig.208.b;
- Rețea amplasată în ambele semimatrițe simetric față de planul de separație al matriței fig. 208.c;
- Rețea amplasată în ambele semimatrițe și prevăzută cu un “ umăr” fig.208.c;

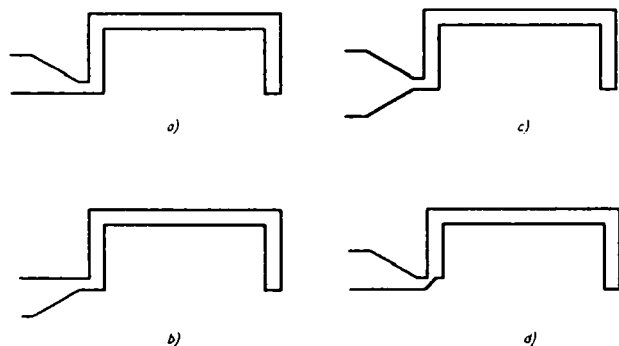


Fig.208 Influența geometriei , poziției canalului și a secțiunii de alimentare

Modul în care se realizează curgerea aliajului prin rețeaua de alimentare, secțiunea de alimentare și cavitatea amprentă reprezintă factorul principal care conduce la o turnare bună fără sufluri și la o umplere în întregime a cavității amprentă.

- **Configurația geometrică a canalului de alimentare în zona secțiunii de alimentare**

Canalul de alimentare are o conicitate de 10:1. Conicitatea canalului în zona secțiunii de alimentare face ca aliajul topit să aibă o valoare a vitezei în secțiunea de alimentare de 50 m/s la o mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune cu viteza de 3 m/s.

În figura 209 este prezentată o porțiune de fluid care începe să se deformeze în timp ce intră sub acțiunea pistonului în porțiunea înclinată a canalului de alimentare.

La $t = 1.7$ m/s figura 209 deformația este deocamdată mică, viteza frontului de curgere a crescut la 5 m/s.

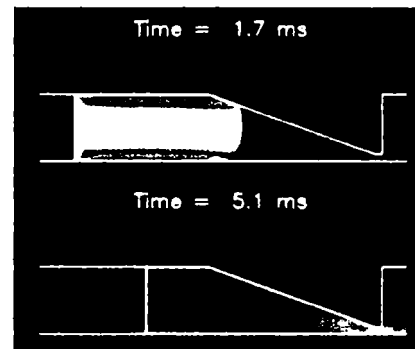


Fig.209 Configurația geometrică a canalului de alimentare

La $t = 5.1$ m/s figura 209 frontul de curgere trece de secțiunea de alimentare și are viteza de 43 m/s.

Figura 210 arată forma jetului din cavitatea amprență în imediata vecinătate a secțiunii de alimentare. La $t = 4.6$ m/s ms frontul de curgere se găsește în imediata vecinătate a intrării în cavitate dar înainte de aceasta. La $t = 5.3$ ms frontul de curgere a pătruns în cavitate prin secțiunea de alimentare. Forma jetului care are o tendință de întoarcere ce se datorează formei canalului de alimentare și a reflexiei jetului la interacțiunea cu peretele de jos a intrării favorizând prin aceasta formarea de goluri la baza secțiunii de alimentare.

În cadrul simulării se urmărește influența poziției și formei secțiunii de alimentare și a canalului de alimentare.

Sunt prezentate în următoarele trei figuri capturi de imagini în momente diferite din cadrul simulării umplerii cavității amprență utilizând diverse poziții ale canalelor de alimentare.

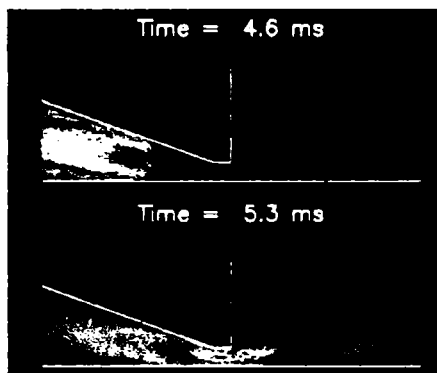


Fig.210 Forma jetului la intrarea în cavitate

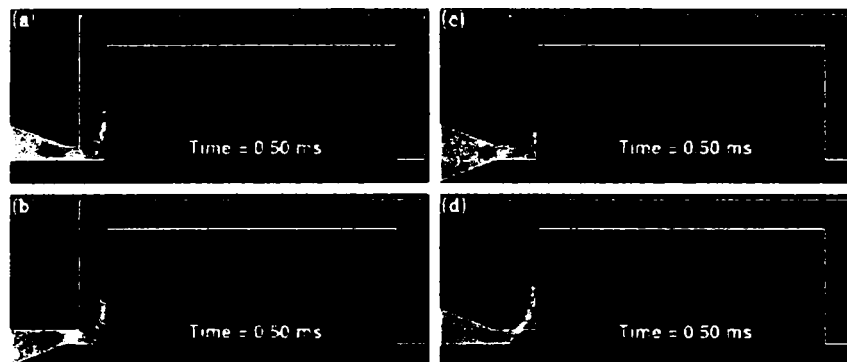


Fig.211 Influența geometriei, poziției canalului și a secțiunii de alimentare la $t=0.5\text{ms}$

Prin inversarea geometriei canalului de alimentare figura 211 b se creează o asimetrie a mișcării fluidului care este direcționat spre cavitatea matriței și produce o subțiere a jetului. În figura 211 c secțiunea intrării fiind simetrică jetul intră orizontal în cavitate perpendicular pe peretele opus forțând de aceasta data umplerea colțului drept al secțiunii verticale. Intrarea din figura 211 c face ca jetul de aliaj să nu umple colțul drept și totodată favorizează umplerea mai ușoară a matriței cu viteze mari ceea ce conduce la apariția de stropi ceea ce nu este deloc avantajos. Cotirea de 135° de la baza suprafeței matriței poate conduce la o desprindere a jetului cu formarea unui mic gol temporar la baza turnării. Acest lucru conduce la posibilitatea apariției unor porozități în regiunea respectivă.

La 1.5 ms figura 212 jetul principal se mișcă de-a lungul secțiunii orizontale a cavității.

Toate variantele sunt similare din punct de vedere al calității curgerii doar cu mici diferențe ce țin în principal de lungimea distanței parcurse de fluid între secțiunea de alimentare și peretele opus acesteia. Pentru secțiunea intrării inversată figura 212 b fluidul intră în matriță puțin mai ușor decât în cazul prezentat în figura 212a. Pentru secțiunea de intrare simetrică figura 212c se observă o divizare mai pronunțată a jetului în două ceea ce face ca umplerea cavității din secțiunea verticală să fie mai bună. Pentru forma secțiunii cu “umăr” figura 212d fluidul intra cu un debit maxim ceea ce face ca umplerea secțiunii verticale să fie cea mai bună, iar frontul de curgere din secțiunea orizontală este cel mai avansat.

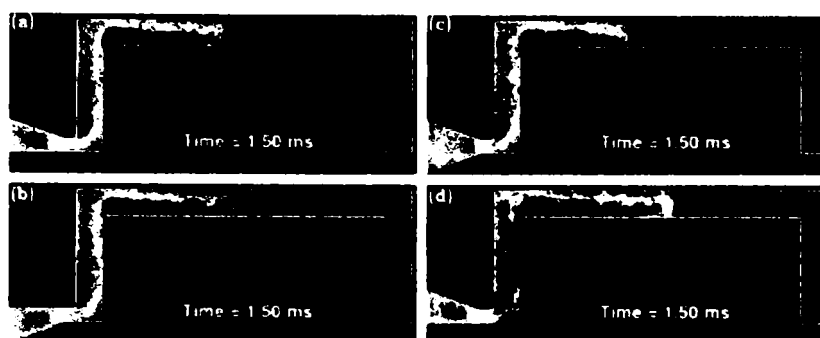


Fig.212 Influența geometriei , poziției canalului și a secțiunii de alimentare la $t=1.5\text{ms}$

Figura 213 arată curgerea pe măsură ce jetul de fluid ajunge la capătul cavității matriței și începe umplerea inversă a acesteia.

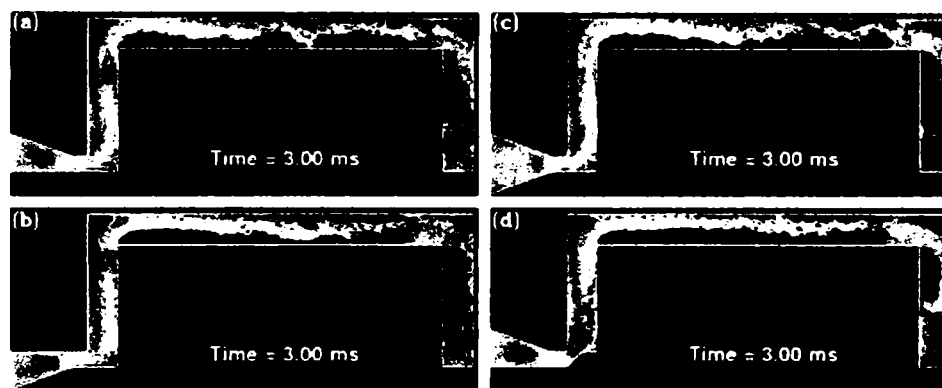


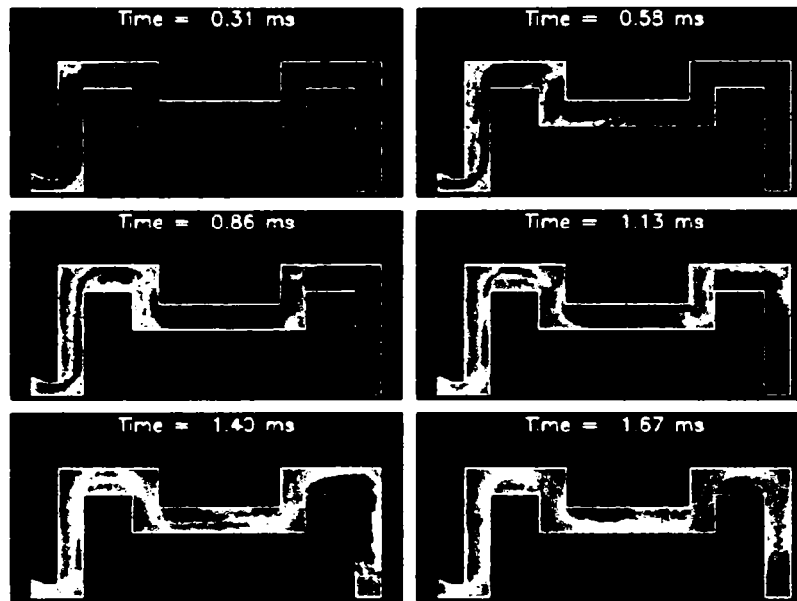
Fig.213 Influența geometriei , poziției canalului și a secțiunii de alimentare la $t=3\text{ms}$

Cea mai mare rezistență o are secțiunea simetrică figura 213c ceea ce conduce la existența unei cantități reduse de fluid în partea de sfârșit a cavității matriței. Cantitatea cea mai mare de fluid în partea de sfârșit a cavității matriței o are cavitatea cu intrarea cu "umăr" figura 213c.

9.2 Studiul influenței formei geometrice a cavității amprență

- Umplerea unei cavități având forma C și S

În figura 214 este arătat modul cum fluidul având numărul $Re = 2500$ umple o cavitate având forma C.

Fig. 214 Umplerea caviții având forma C și $Re=2500$

Jetul de fluid imediat după ce a intrat în cavitatea forme C lovește peretele opus intrării și este obligat să urce vertical având contact permanent doar cu peretele din dreapta a secțiunii verticale. După un timp de 0.31 ms jetul lovește partea de sus a cavității și se produce o bifurcare a lui. Ramura din stânga a jetului parcurge o distanță relativ scurtă până în colțul din stânga sus după care este obligat să se reîntoarcă înspre secțiunea de intrare. Ramura din dreapta a jetului după bifurcație este dirijată în lungul secțiunii orizontale, ptându-se observa și o împrăștiere a jetului de fluid. Dacă în masa de fluid se găsesc particule solidificate acest tip de curgere va genera apariția porozităților.

La 0.58 ms jetul din secțiunea orizontală lovește peretele vertical opus producându-se o nouă bifurcare a acestuia. Se observă și de această dată faptul că o ramură a jetului se întoarce înapoi formând un gol, iar cealaltă ramură continuă mișcarea de înaintare de-a lungul cavității lovind peretele opus, orizontal, de această dată producându-se o nouă bifurcare a jetului. Ramura care se întoarce provoacă un al doilea gol de aer iar cealaltă ramură se mișcă în lungul secțiunii orizontale jetul fiind subțire și împrăștiat.

La 0.86 ms se poate observa un jet subțire neregulat în secțiunea orizontală. La 1.13 ms jetul de fluid se îngroașă iar partea de început a cavității este umplută în întregime. Și de această dată se observă o divizare a jetului în două la impactul acestuia

cu peretele orizontal. Ramura din stânga jetului se reîntoarce formând un gol, iar ramura din dreapta se mișcă în lungul secțiunii orizontale menținând în permanență contactul cu peretele superior al acestei secțiuni.

La 1.40 ms are loc o puternică umplere cu fluid a secțiunii orizontale datorate jetului de fluid care se mișcă în sens invers. Datorită existenței celor două jeturi se formează cele două goluri de aer atât în secțiunea orizontală cât și în secțiunea verticală.

La 1.67 ms umplerea cu fluid a cavității este mai pronunțată golurile de aer sunt mai reduse.

Cu ajutorul acestei simulări se poate determina pozițiile de amplasare a maselotelor de aerisire.

Aceleași fenomene de divizare a jetului în momentul impactului cu un perete opus și de formare a unui jet de întoarcere care conduce la formarea de goluri de aer sunt întâlnite și la curgerea fluidului în timpul umplerii unei cavități de formă S, a cărei simulare de umplere este prezentată, pentru patru momente diferite din cadrul procesului de umplere, în figura 215.

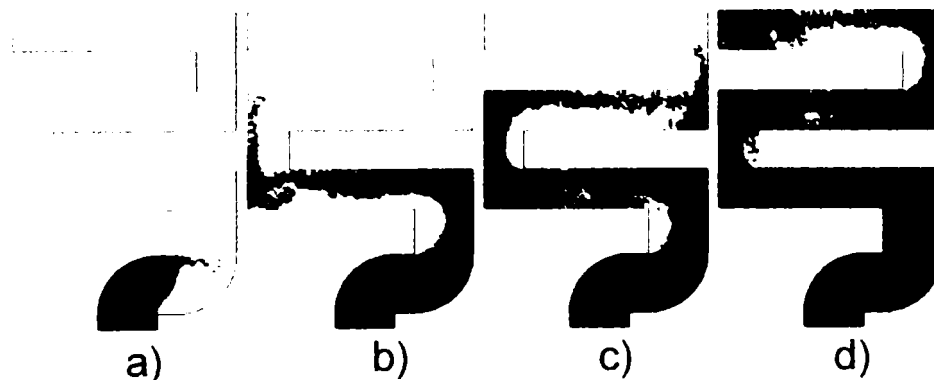


Fig.215 Umplerea unei cavități de formă S

- **Umplerea unei cavități sub forma unui disc circular cu miez**

Umplerea unei cavități sub forma unui disc circular cu miez este prezentată în figura 216 pentru diverse momente ale umplerii.

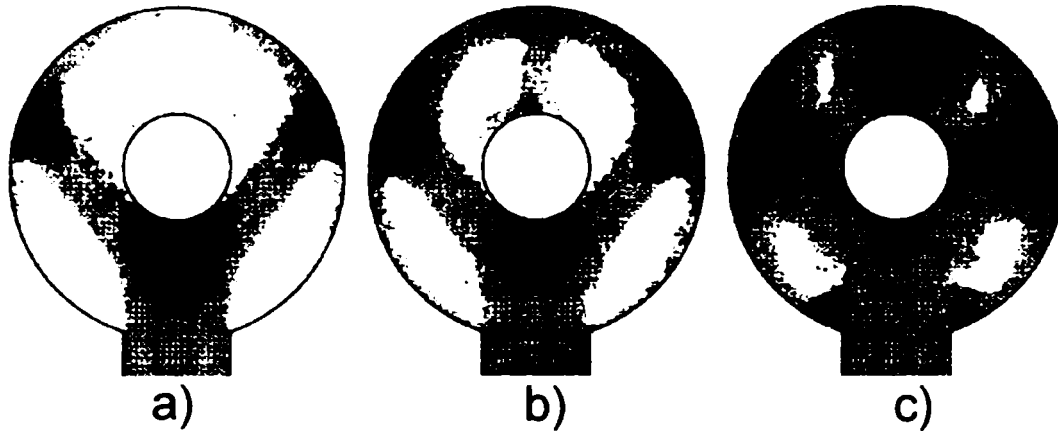


Fig.216 Umplerea cavității sub forma unui disc circular.

Odată ce jetul intră în interiorul cavității lovește miezul situat în interiorul cavității producându-se divizarea acestuia în două jeturi mai subțiri, care la rândul lor lovesc pereții cavității. În urma impactului celor două jeturi cu pereții cavității are loc o nouă divizare a celor două jeturi ca în figura 216 a. Cele două jeturi din partea superioară a cavității circulare la un moment dat se unesc formând un jet având direcția de curgere orientată înspre miez, iar celelalte două jeturi din partea inferioară a cavității circulare sunt orientate înspre secțiunea de intrare, lucru ilustrat în figura 216 b. Acest tip de curgere duce la formarea de goluri de aer.

În figura 216 c umplerea este aproape completă și sunt vizibile cele două perechi de goluri superioare respectiv inferioare datorate curgerii inverse a jeturilor de fluid.

În concluzie putem vedea că rezistența de intrare a fluidului prin poartă poate afecta în mod modest distribuția fluidului în matriță. În mod cocret cu cât rezistența la intrarea în cavitate este mai mică cu atât fluidul intră mai ușor iar distanța pe care este pulverizat lichidul este mai mare. În cazul unei rezistențe la intrare mari fluidul nu mai parcurge o distanță prea mare și umple mai bine regiunile din matriță în care a pătruns.

- **Umplerea unei cavități rectangulare**

În figura 217 este prezentată simularea umplerii unei cavități rectangulare cu dimensiunile de 10 mm înălțime și 20mm lungime.

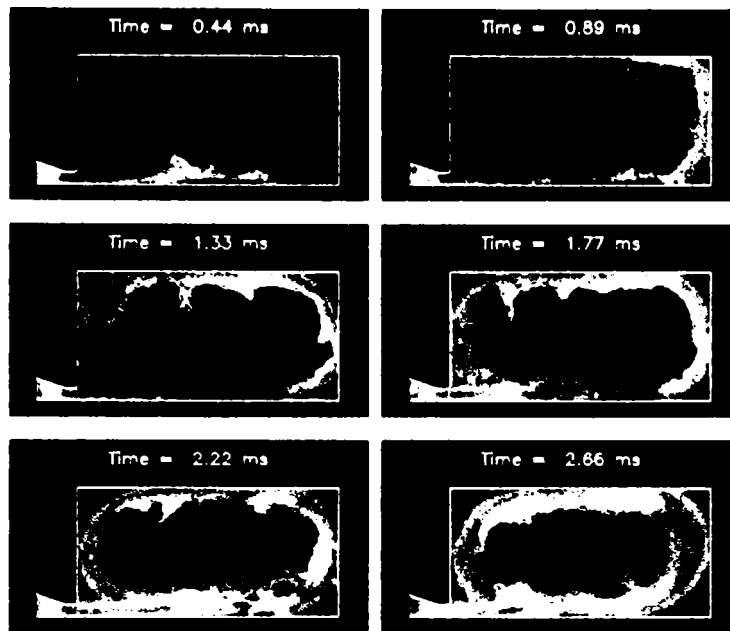


Fig.217 Umplerea unei cavități rectangulare (10mmx20mm)

În figura 218 este prezentată simularea umplerii unei cavități rectangulare cu dimensiunile de 10 mm înălțime și 50 mm lungime.

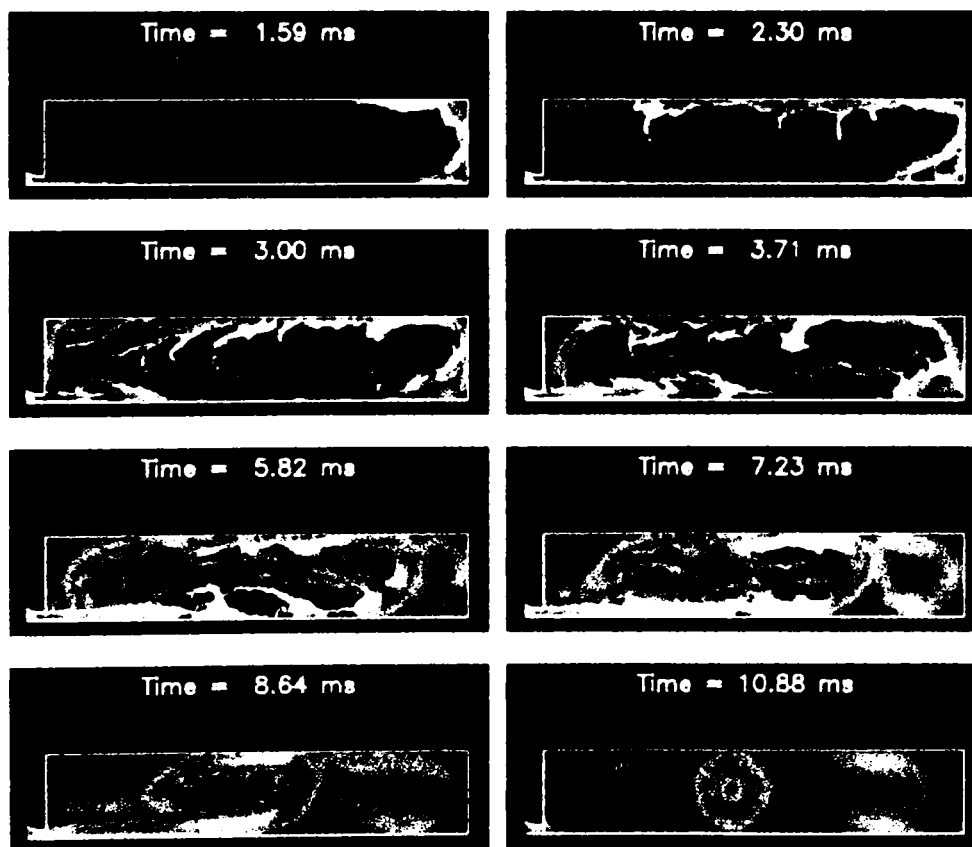


Fig.218 Umplerea unei cavități rectangulare (10mmx50mm)

9.3 Influența vitezei jetului la intrarea în cavitatea matriței prin secțiunea de alimentare

Fluidul este introdus în cavitatea formeii sub acțiunea unui piston. Mișcarea pistonului în cadrul simulării se face în două moduri:

- pistonul se mișcă cu viteză constantă figura 219b ceea ce conduce la o viteză de asemenea constantă a jetului prin secțiunea de intrare în cavitatea matriței;

- pistonul se mișcă cu o viteză variabilă figura 219a astfel încât să se asigure la intrarea în cavitatea matriței o viteză variabilă în conformitate cu geometria formeii asigurând o umplere completă și fără sufluri a cavității amprentă;

În figura 220 sunt prezentate diagramele de viteză a jetului la ieșirea din secțiunea de alimentare în cele două cazuri de mișcare a pistonului considerate.

În figura 220a se prezintă umplerea unei cavități cu viteza jetului în secțiunea de intrare variabilă respectiv constantă figura 220b.

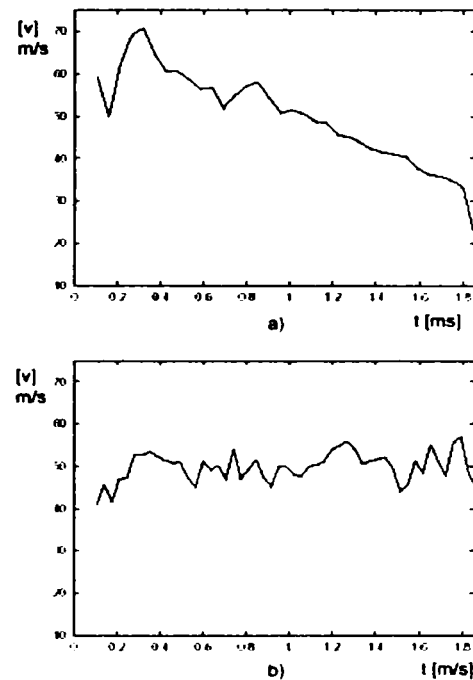


Fig.219 Diagrama vitezei în secțiunea de intrare; a – viteză variabilă; b- viteză constantă.



Fig.220 Umplerea unei cavității:
 a- cu viteza variabilă în secțiunea de alimentare , b – cu viteză constantă în secțiunea de alimentare

În cazul umplerii cavității amprentă cu un jet având viteză variabilă în secțiunea de alimentare se constată că frontul de curgere avansează mult mai rapid decât în cazul unui jet care are viteză constantă prin secțiunea de alimentare.

Se poate observa că la $t = 0.21\text{ms}$ figura 220 jetul, în cazul vitezei variabile prin secțiunea de alimentare, lovește peretele superior al secțiunii orizontale în timp ce în

cazul jetului cu viteză constantă în secțiunea de alimentare se află doar la jumătatea secțiunii verticale.

Jetul în cazul vitezei variabile prin secțiunea de alimentare figura 220a realizează o umplere a cavității forme mai bună.

Umplerea folosind pentru secțiunea de alimentare o viteză variabilă se realizează fără golurile aer (sufluri), acest lucru se poate realiza datorită faptului că golurile de aer ce se formează în timpul umplerii sunt mult mai reduse și mai bine recirculate.

Atât în cazul vitezei variabile prin secțiunea de alimentare cât și în cazul vitezei constante prin această secțiune timpul de umplere a cavității amprentă este același.

9.4 Influența numărului Re asupra umplerii cavității matriței

În figura 221 este prezentată influența numărului Re asupra umplerii cavității matriței în diverse momente ale procesului.

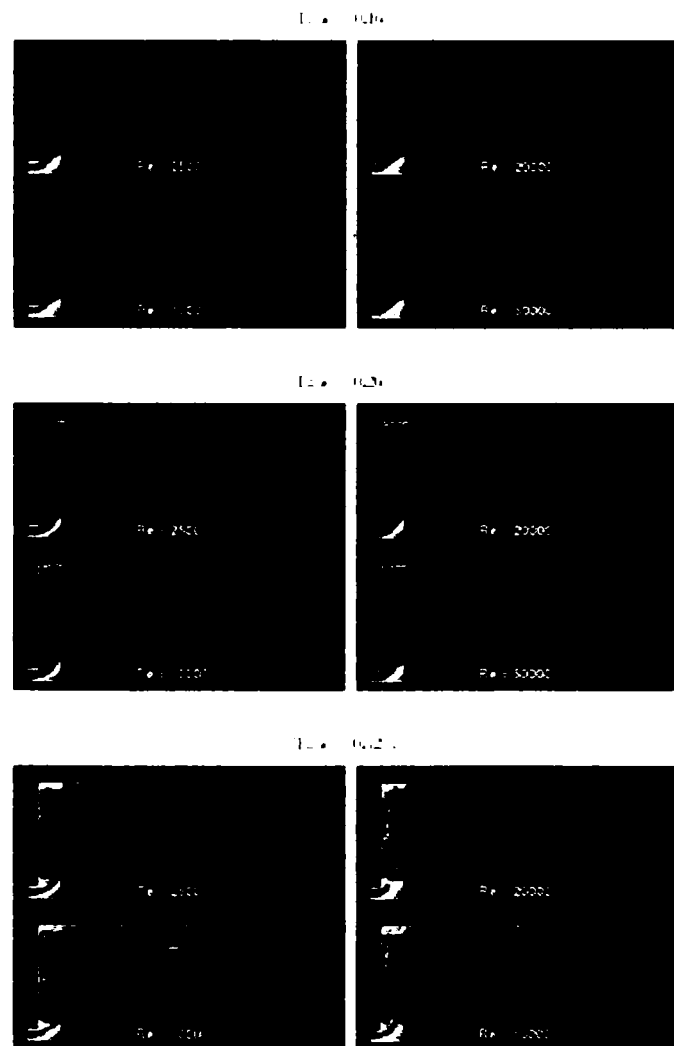


Fig.221 Influența numărului Re asupra umplerii matriței

Fig. 220

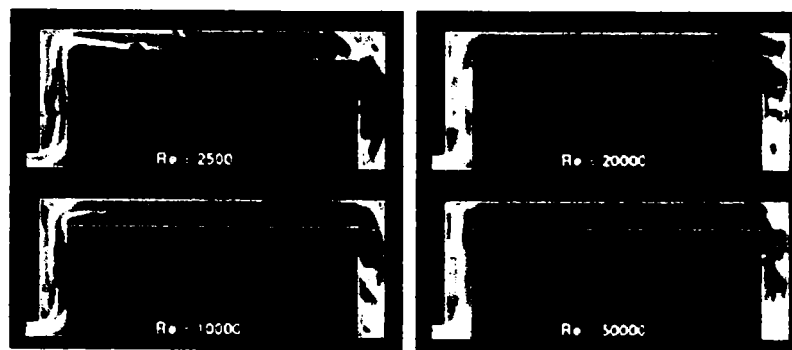


Fig. 221

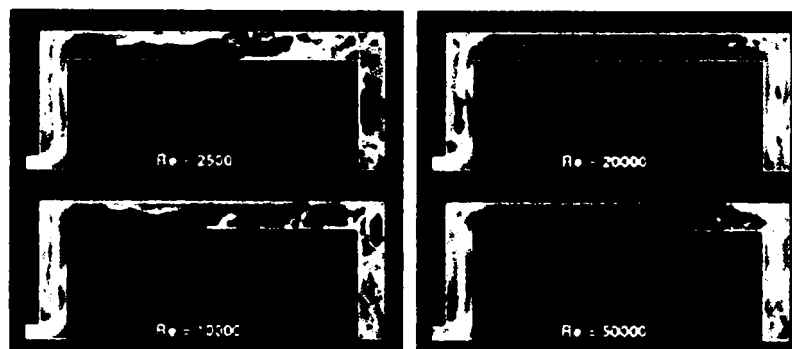


Fig. 222

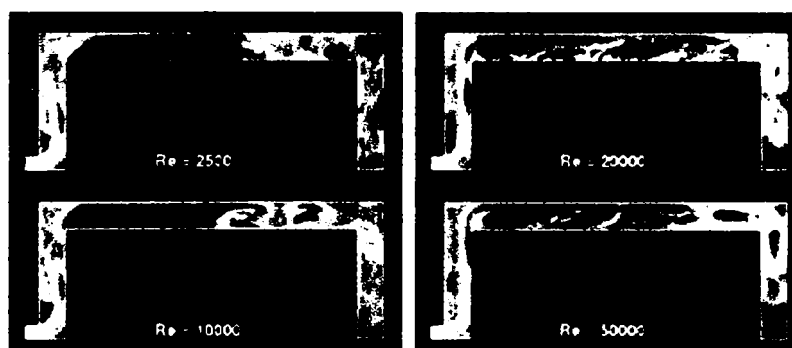


Fig.221 Influența numărului Re asupra umplerii matriței (continuare)

Pentru un număr $Re = 50000$ umplerea cavității se face într-un timp scurt figura 221 dar cu acumulări de gaze în interiorul cavității matriței.

Pentru $Re = 10000$ umplerea necesită un interval de timp mai mare figura 221 dar sunt eliminate acumulările de gaze din interiorul cavității matriței.

9.5 Analiza umplerii pentru diverse repere

- piston

Piesa împreună cu rețeaua de alimentare este prezentată în figura 222.

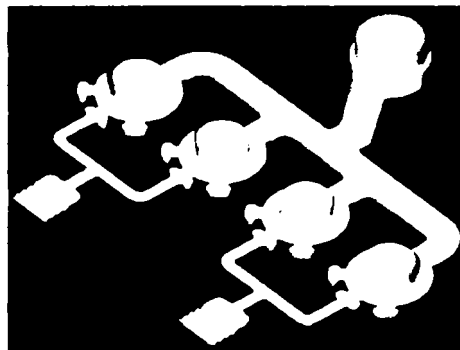


Fig.222 Piston : piesa cu rețeaua de alimentare

Simularea umplerii este prezentată în figura 223.

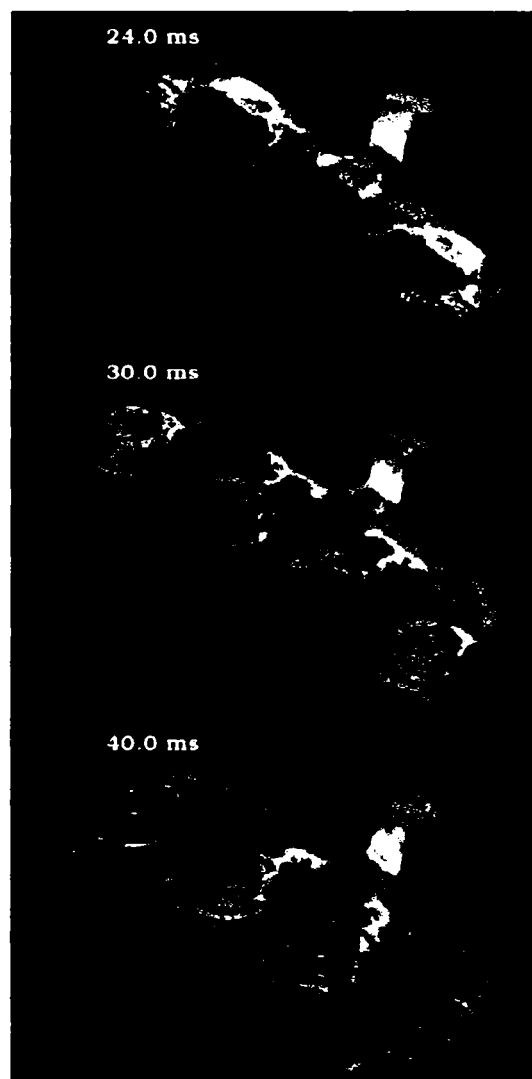


Fig.223 Umplerea cavității în cazul pistonului

- carcasă

Configurația piesei este cea din figura 224

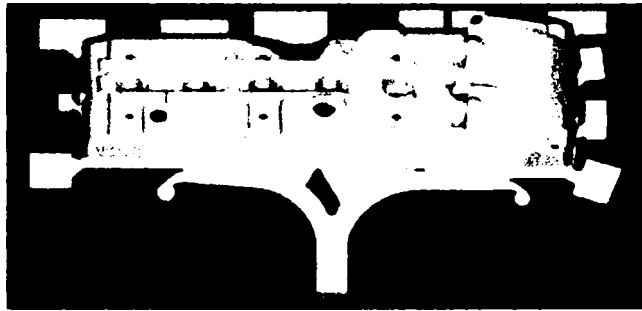


Fig.224 Carcasă: piesa împreună cu rețeaua de alimentare și masele

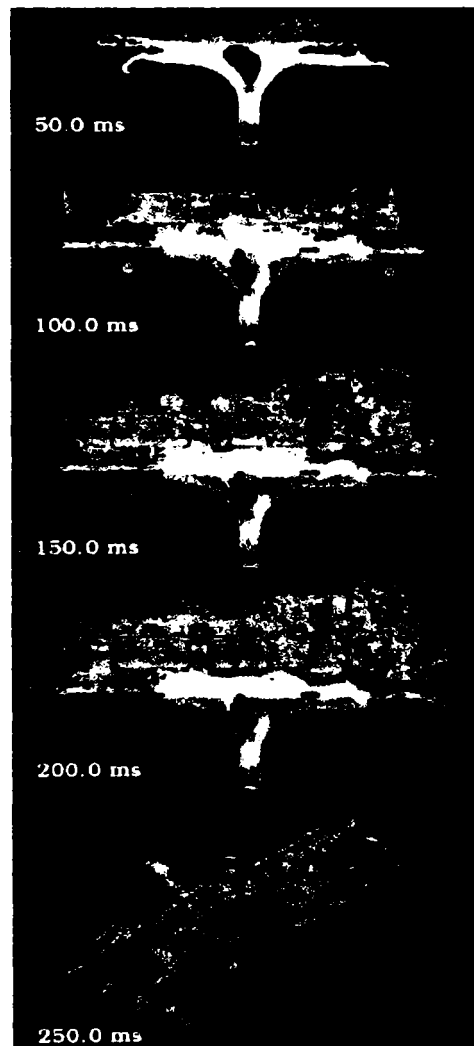


Fig.225 Analiza umplerii cavității amprentă pentru reperul carcasă.

Analiza umplerii cavității matriței pentru diferite momente este prezentată în figura 225.

- racord

Configurația piesei este cea din figura 226.



Fig.226 Racord: piesa împreună cu rețeaua de alimentare și maselote

Analiza umplerii cavității matriței pentru diferite momente este prezentată în figura 227.

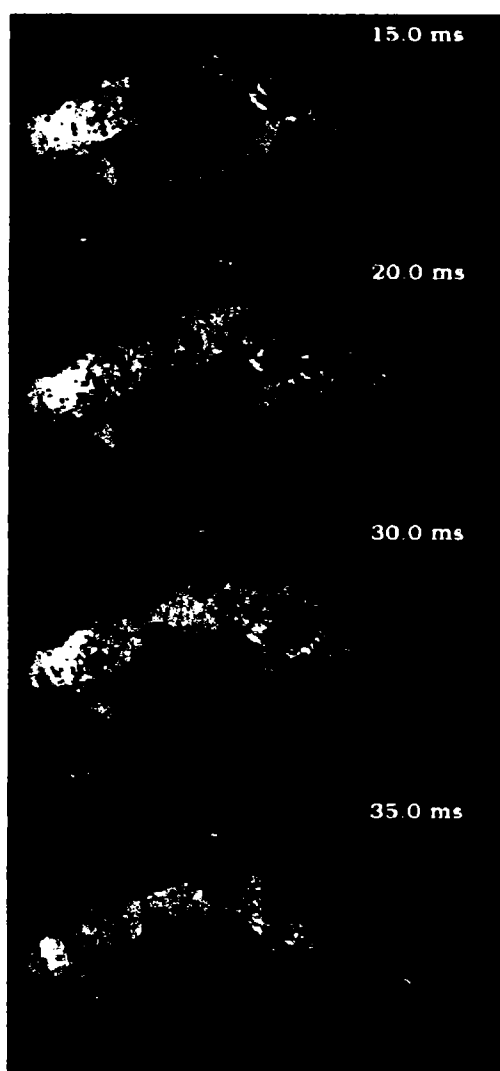


Fig.227 Analiza umplerii cavității amprentă pentru reperul racord.

- suport

Configurația piesei este cea din figura 228

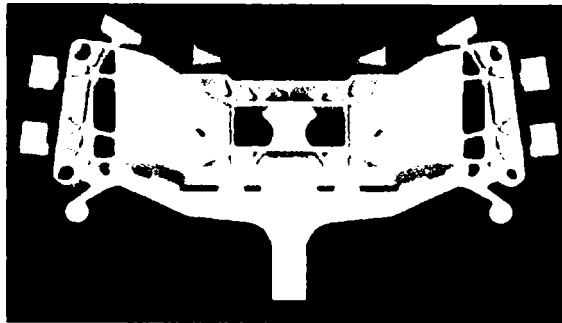


Fig.228 Suport: piesa împreună cu rețeaua de alimentare și maselote

Analiza umplerii cavității matriței pentru diferite momente este prezentată în figura 229.

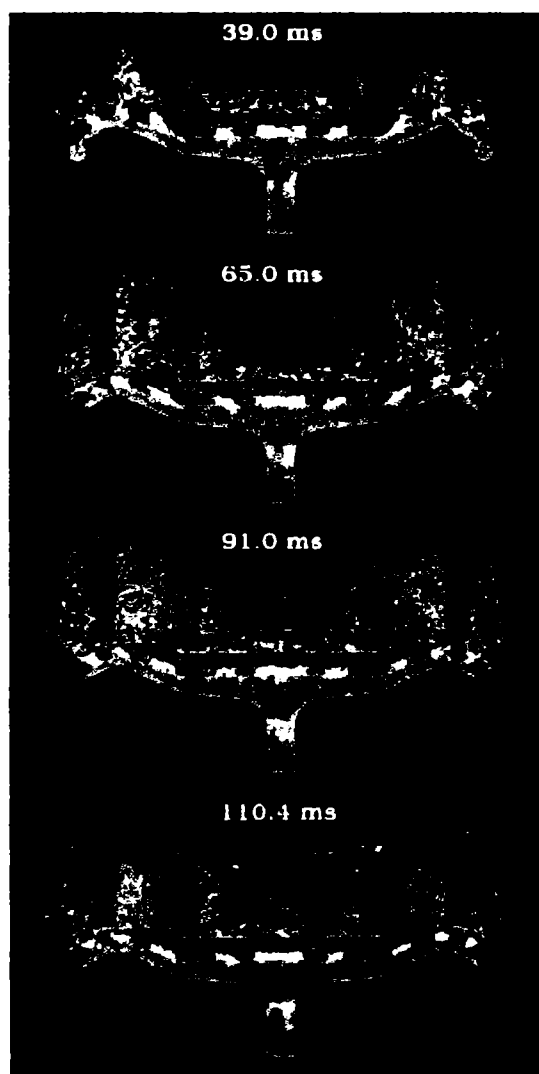


Fig.229 Analiza umplerii cavității amprență pentru reperul suport.

- placă

Configurația piesei este cea din figura 230



Fig.230 Placă: piesa împreună cu rețeaua de alimentare și masele

Analiza umplerii cavității matriței cu punerea în evidență a temperaturii pentru diferite momente este prezentată în figura 231.

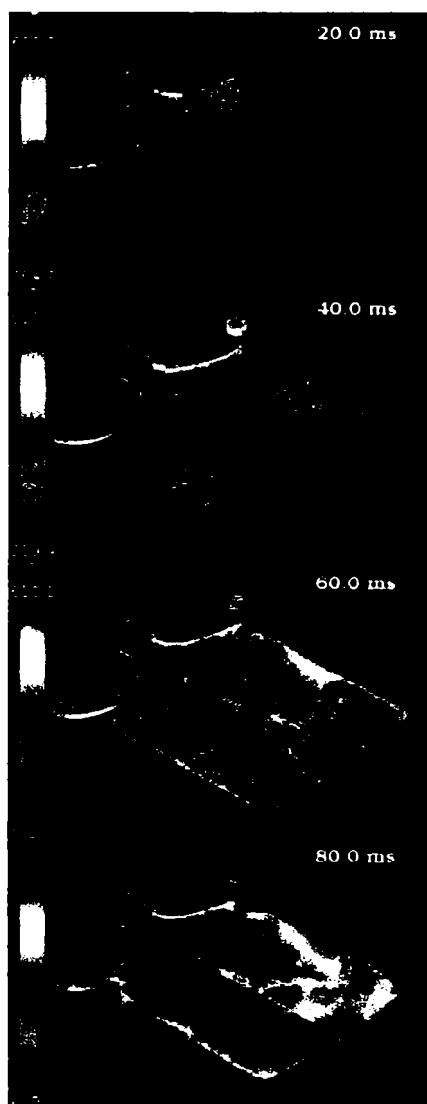


Fig.231 Analiza umplerii cavității amprentă pentru reperul placă.

Variația vâscozității în decursul procesului de umplere este redată în figura 232

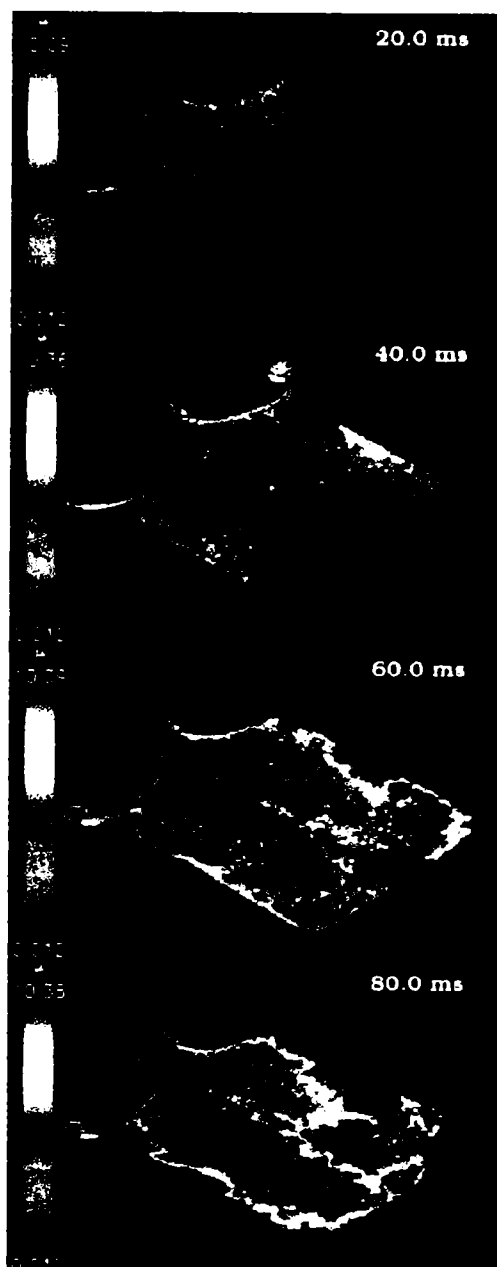


Fig.232 Analiza umplerii cavității
amprentă pentru reperul placă cu
punerea în evidență a vâscozității.

Experimentări privind analiza umplerii cavității amprentă cu aliaj topit în cazul turnării sub presiune.

10.1 Introducere

În cadrul capitolului, se prezintă metodologia și rezultatele experimentale de vizualizare a modului de umplere a cavității amprentă cu aliaj topit.

Experimentările urmăresc verificarea și validarea rezultatelor simulării umplerii cavității obținută cu ajutorul calculatorului și prezentate în capitolul 9.

Pentru efectuarea încercărilor experimentale s-au realizat trei matrițe cu ajutorul cărora se obțin imaginile umplerii a trei cavități amprentă având forme diferite.

Construcția matriței se rezumă la placa activă în care se realizează amprenta, cele două ecrane de vizualizare construite din material transparent și două plăci de fixare figura 233.

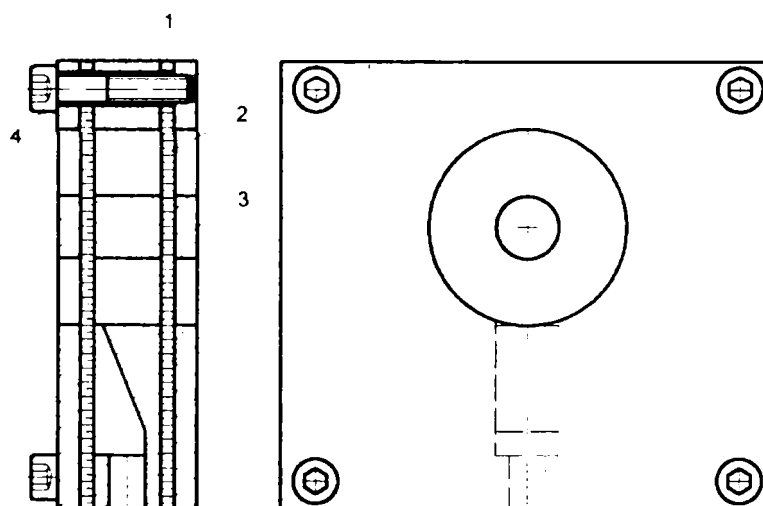


Fig. 233 Matrița. 1- placa activă; 2- ecran; 3- placă de fixare; 4- șurub de fixare.

Având la bază construcția matriței descrisă în figura 233 s-au construit trei matrițe având cavitățile amprentă diferite de forma C, S și circulară, ele fiind prezentate în

fotografiile din figura 234 a, b, c iar plăcile active corespunzătoare sunt prezentate în figura 235 a, b, c.

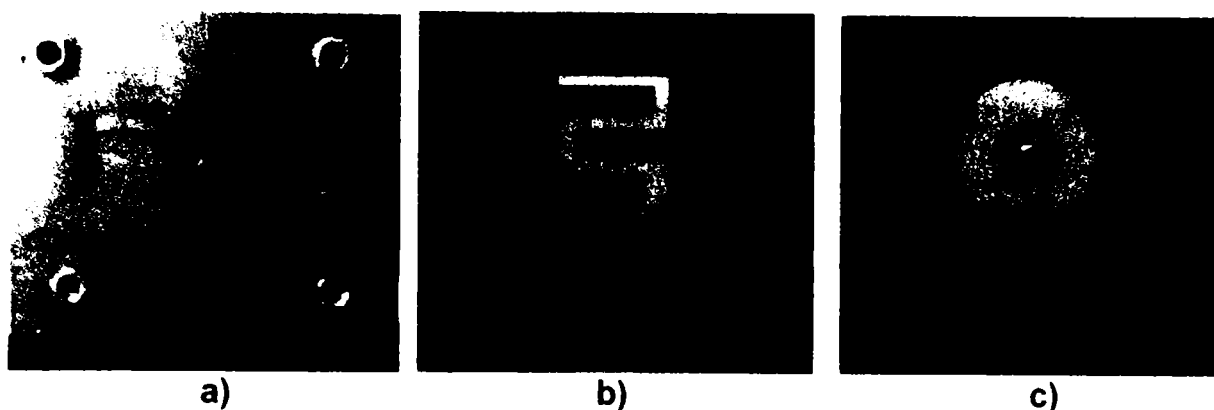


Fig. 234 Matrițe experimentale; a- cavitate având forma c; b- cavitate având forma S; c- cavitate având forma circulară;

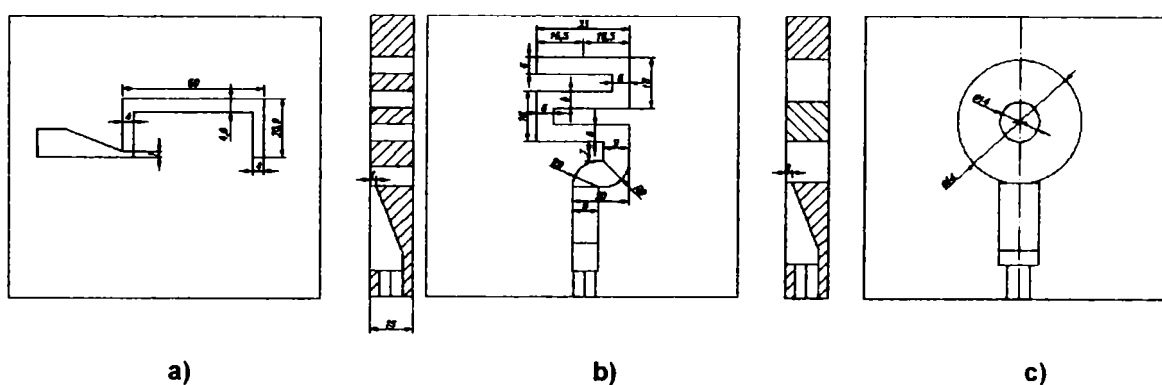


Fig. 235 Plăci active; a- forma C; b- forma S; c- circulară

Standul pentru efectuarea experimentărilor prezentat în figura 236 se compune dintr-un cilindru cu piston acționat de un motor electric prin intermediul transmisiei șurub piuliță. La ieșirea din cilindru este legată matrița. Motorul electric de acționare este legat la un variator de turație cu ajutorul căruia se comandă mișcarea pistonului. Camera video realizează capturi de imagini din timpul umplerii matriței și le transmite la calculator. Agentul de lucru este apa. Fotografia standului este prezentată în figura 237.

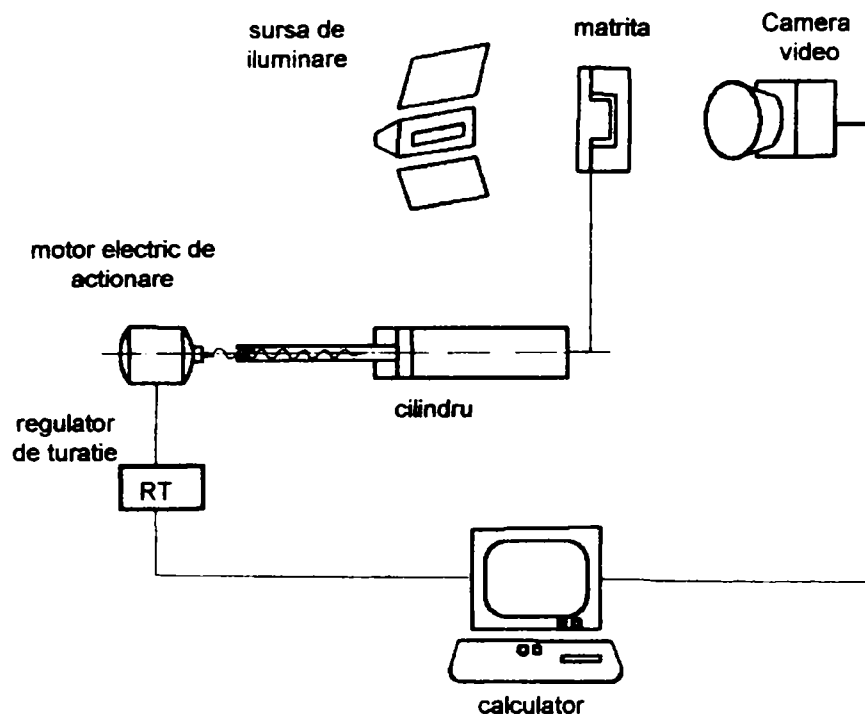


Fig. 236 Standul pentru realizarea experimentelor.



Fig.237 Fotografia standului pentru efectuarea experimentelor

10.2 Metodica experimentelor

- Validarea umplerii cavității amprență având forma C.

Pentru realizarea umplerii cavității se va monta pe stand matrița figura 234 a. Se va asigura o viteză de 0.67 m/s la intrarea în cavitatea amprență prin reglarea turației motorului electric și prin aceeași viteză de deplasare a pistonului. În urma realizării experimentului se obțin, pentru diferite momente ale umplerii cavității amprență, capturi

de imagini ca cele prezentate în figura 238. În figura 239 sunt prezentate capturi de imagini din timpul simulării pe calculator

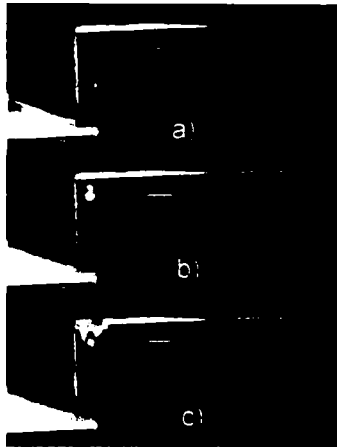


Fig.238 Umplerea cavității având forma C

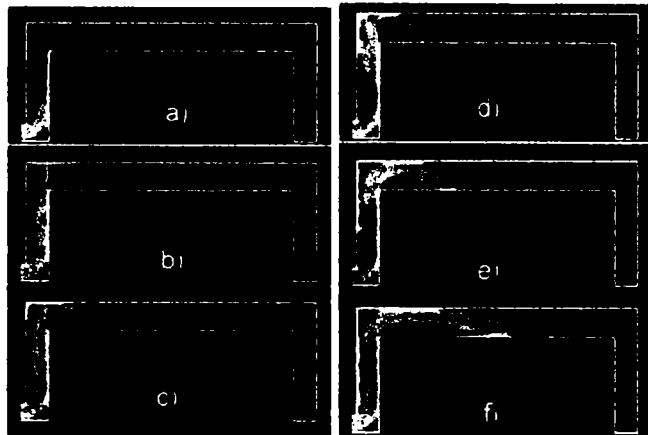
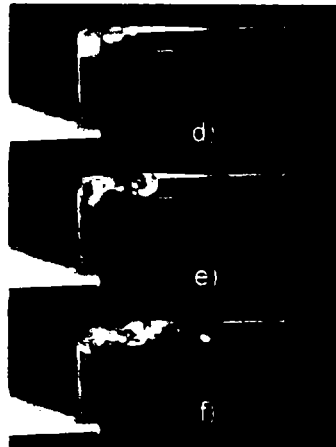


Fig.239 Umplerea cavității având forma C

- Validarea umplerii cavității amprență având forma S.

Se va monta pe stand matricea figura 234 b asigurându-se o viteză la intrare în cavitatea amprență de 8.7 m/s. Capturile de imaginii obținute în timpul desfășurării experimentului, pentru diverse momente ale umplerii cavității amprență, sunt prezentate în figura 240.

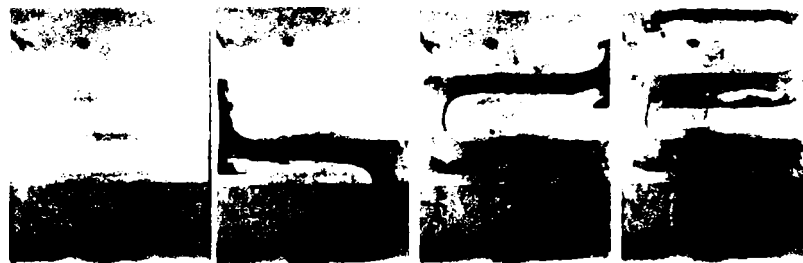


Fig.240 Umplerea cavității având forma S

- Validarea umplerii cavității amprență având formă circulară;

După ce pe stand s-a montat matricea din figura 234 b și se comandă mișcarea pistonului astfel încât să se asigure o viteză de 18 m/s la intrarea în cavitățile amprență

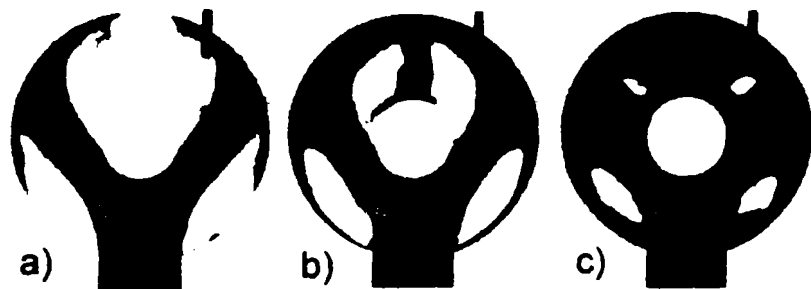


Fig.241 Umplerea cavității având forma circulară

se obțin capturile de imagini prezentate în figura 241.

Pentru viteze de umplere mai mici decât 18m/s se constată că umplerea se realizează tot prin divizarea jetului în două dar acestea nu mai ajung în contact cu pereții cavității figura 242. Se constată o umplere fără goluri de aer în partea inferioară a cavității. Pentru viteze mai mari de 18m/s umplerea se realizează ca în figura 243 cu acumularea de goluri de aer.

10.3 Concluzii în urma experimentului

În urma experimentului de umplere a cavităților amprentă se poate trage concluzia că umplerea realizată prin simulare figurile 215, 216 și 239 se arată foarte mult de ceea ce s-a obținut pe cale experimentală.

Comanda mișcării pistonului în vederea umplerii cavității s-a realizat ca și o axă de robot obținându-se de fiecare dată viteza, stabilită în conformitate cu procesul tehnologic prin reglarea turației motorului electric cu ajutorul regulatorului de turație.

Vizualizarea umplerii cavității matriței prin simulare pe calculator conduce la o umplere completă fără goluri de aer și o umplere corespunzătoare a rețelei de alimentare (secțiunile de alimentare și a celei de aerisire a cavității) și prin aceasta la reducerea numărului de intervenții asupra matriței în vederea eliminării unor neajunsuri ce se pot elimina în faza de simulare.

Tot cu ajutorul simulării umplerii cavității matriței pentru cavități complexe se poate determina variația vitezei aliajului topit în secțiunea de intrare în cavitatea amprentă astfel încât să se poată umple întreaga cavitate a matriței. Această variație a vitezei în secțiunea de alimentare este folosită pentru determinarea legii de mișcare a pistonului.

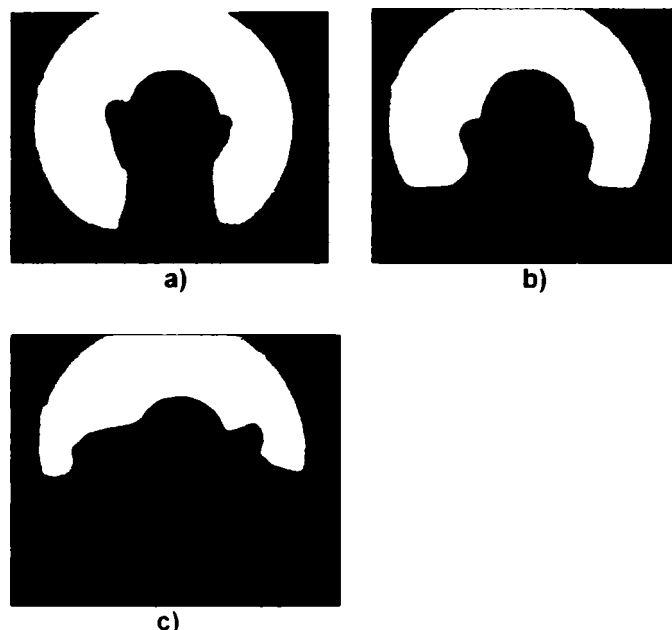


Fig.242 Umplerea cavității având forma circulară



Fig.243 Umplerea cavității având forma circulară

Contribuții originale. Concluzii finale

11.1 Contribuții originale

11.1.1 Introducere

Teza de doctorat abordează elaborarea unei metode de determinare a unei legi de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune în conformitate cu procesul tehnologic de turnare sub presiune astfel încât conducerea acestuia să se realizeze ca și a unei axe de robot.

În cadrul lucrării s-au urmărit 4 obiective principale:

1. Stabilirea unei metodologii de determinare a legii de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune pe baza procesului tehnologic;
2. Modelarea și simularea conducerii pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de robot;
3. Introducerea sistemelor CAD/CAM/CAE în realizarea pieselor turnate sub presiune;
4. Testarea practică a simulării umplerii cavităților amprentă.

Principalele contribuții originale ale autorului în vederea realizării obiectivelor propuse prin abordarea tematicii din prezenta teză de doctorat se pot grupa în următoarele direcții principale și anume:

- în domeniul sistematizării informațiilor bibliografice;
- în domeniul structurării procesului complex de realizare a pieselor turnate sub presiune în domeniul elaborării unor noi metode de proiectare a matrițelor de turnat sub presiune;
- în domeniul aplicațiilor practice și industriale;
- în domeniul cercetării experimentale.

11.1.2 Contribuții în domeniul sistematizării informațiilor bibliografice

S-a realizat o sistematizare a informațiilor extrase din materialul bibliografic după cum urmează:

- privind aliajele neferoase utilizate la turnarea sub presiune fiind prezentate clasificarea generală, proprietățile termofizice, proprietățile reologice ale acestora;
- privind tehnologia turnării sub presiune insistând asupra definirii procesului de turnare sub presiune, asupra curgerii aliajului lichid în cavitatea formei și a transferului termic la interacțiunea aliaj formă metalică;
- privind echipamentul folosit în cadrul procesului de turnare sub presiune insistând asupra construcției și funcționării matriței și asupra clasificării și prezentării mașinilor de turnat sub presiune;
- privind roboții industriali utilizați la turnarea sub presiune în sistemele de fabricație flexibile;
- a principalelor tipuri de acționări a roboților industriali cu o paralelă între aceste acționări precum și evoluția lor în timp scoțând în evidență avantajele și dezavantajele acționării hidraulice, acționare utilizată de către autor în cazul acționării pistonului mașinii de turnat sub presiune;
- privind structura și organologia sistemelor de acționare hidraulică, insistând în mod special pe tipurile de motoare hidraulice de acționare și a echipamentelor de distribuție servocomandate;

11.1.3 Contribuții în domeniul structurării procesului complex de realizare a pieselor turnate sub presiune din aliaje neferoase

Aceste contribuții cuprinse în capitolele 2 și 4 sunt:

- structurarea tehnologiei de realizare a pieselor turnate sub presiune accentul este pus pe delimitarea procesului în trepte de proces;
- privind pierderile de presiune la curgerea aliajului topit prin canalele de alimentare și cavitatea amprentă;

Contribuții cuprinse în capitolul 4 :

- în ce privește concepția constructivă și tehnologică accentul fiind pus pe alegerea planului de separație în funcție de așezarea piesei în matriță și de alegere a locului de alimentare cu aliaj topit a cavității matriței în vederea unei dezmembrări cât mai ușoare;

- în ce privește utilizarea sistemelor CAD/CAM/CAE în tehnologia de realizare a pieselor turnate sub presiune din aliaje neferoase;

- exemplificarea capabilității modelului FEM al unei piese turnate sub presiune cu accentul pe distribuția căldurii în piesele turnate sub presiune și curgerea aliajului topit.

Contribuții cuprinse în capitolul 5 sunt:

- în ce privește elaborarea modelului matematic a mișcării pistonului mașinii de turnat sub presiune;

- în ce privește determinarea poziției pistonului în timpul procesului de turnare sub presiune;

- în ce privește determinarea legii de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune, considerându-l ca o axă de robot, pe baza procesului tehnologic de turnare sub presiune.

Contribuții cuprinse în capitolul 8:

- modelarea matematică și simularea funcționării pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de translație a unui robot.

Contribuții cuprinse în capitolul 10:

- conceperea și efectuarea experimentărilor de simulare a umplerii cavității amprentă.

11.1.4 Contribuții în domeniul aplicațiilor practice și industriale

- realizarea unor tehnologii de turnare sub presiune pentru diverse repere;

- realizarea unui program în matlab pentru determinarea legii de mișcare a pistonului mașinii de turnat sub presiune;

- introducerea sistemului CAD/CAM/CAE în proiectarea produselor și matrițelor de turnat sub presiune și simularea umplerii cavității amprentă.

Se poate considera că rezultatele acestor cercetări au găsit o totală aplicare în sfera industrială, iar direcțiile de cercetare au fost impuse de realitatea practică prin aceasta bucla de feedback închizându-se deplin.

11.1.5 Contribuții în domeniul cercetării experimentale

Contribuțiile cuprinse în capitolele 8 și 10 sunt:

- modelarea matematică și simularea funcționării pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de robot;
- conceperea și efectuarea simulării umplerii cavității amprentă.

11.1.6 Direcții de cercetare viitoare

Având în vedere faptul că în domeniul turnării sub presiune este unul foarte dinamic, lucrarea prezentată este un început.

Nu se poate spune că cercetarea pe care autorul a realizat-o până acum are un punct final.

Unele dintre rezultatele cercetării efectuate de către autor în cadrul prezentei teze de doctorat au fost publicate în trei articole ale revistei *Robotică și management*.

Rezultatele cercetării privind comanda pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de robot pot fi utilizate în cadrul automatizării procesului de turnare sub presiune alături de automatizarea alimentării cu aliaj topit a camerei de compresie și evacuarea pieselor din spațiul de lucru în cadrul sistemelor de fabricație flexibile robotizate.

11.2 Concluzii finale

Prin realizarea obiectivelor propuse la debutul lucrării de doctorat cu titlul " Programarea sistemelor robotizate în turnătorii pe baza modelului matematic al procesului tehnologic " și precizate în paragraful 11.1, s-a elaborat prezenta lucrare conținând 12 capitole, fiind prezentate 243 figuri, 23 tabele și 260 relații, pe un număr de 282 pagini.

În cazul turnării sub presiune pentru a asigura o umplere completă a matriței este foarte importantă viteza de curgere a aliajului în lungul rețelei de turnare și a cavității amprentă.

Autorul în capitolul 9 realizează un studiu al diverșilor factori ce influențează curgerea aliajului topit în interiorul cavității matriței utilizând simularea pe calculator. Cu ajutorul simulării umplerii cavității matriței se poate determina legea de mișcare a pistonului, asigurându-se astfel posibilitatea conducerii automate a mișcării acestuia.

În concluzie pe baza rezultatelor obținute și prezentate în lucrare autorul consideră că obiectivele propuse la abordarea temei au fost îndeplinite și că lucrarea elaborată poate fi utilă proiectanților în domeniul turnării sub presiune și cel al roboticii prin dezvoltările sale teoretice și aplicative, sistematizarea informațiilor documentare și prin materialul bibliografic prezentat.

Astfel că, autorul își aduce contribuția la definirea treptelor de proces din cadrul procesului de turnare sub presiune, și, pe baza acestora, la elaborarea unei metodologii originale de determinare a poziției pistonului mașinii de turnat sub presiune, în timpul procesului de turnare sub presiune, și, la determinarea legii de mișcare a acestuia.

O altă contribuție a autorului o reprezintă propunerea comenzii axei pistonului mașinii de turnat sub presiune ca și o axă de translație a unui robot cu acționare hidraulică și conducerea ei prin calculator, precum și modelarea și simularea funcționării axei, atât cu model fără regulatoare cât și cu regulatoare.

Rezultatele experimentale obținute și prezentate în capitolul 10 au validat corectitudinea simulării umplerii cavității amprentă pentru diverse geometrii ale cavității acesteia.

Bibliografie

- [A.1] ABRUDAN I. : Sisteme flexibile de fabricație. Concepte de proiectare și management. Editura Dacia 1996.
- [A.2] ALBIȚĂ GH., RĂDULESCU C. : Bazele proceselor de turnare a metalelor și aliajelor. Editura Tehnică București 1980.
- [A.3] ANCUȘA V. : Mecanica fluidelor și mașini hidraulice, volumul I și II: Curs litografiat Institutul Politehnic " Traian Vuia " Timișoara 1982.
- [A.4] ANTONESCU P. : Sinteza manipuletoarelor. Universitatea Politehnică București 1993.
- [A.5] *** ANSYS 5.3 Documentația tehnică, 1986.
- [B.1] BĂLĂȘOIU V. Cercetări teoretice și experimentale asupra sistemelor electrohidraulice tip servovalvă pentru module de roboți industriali. Teză de doctorat : Institutul politehnic " Traian Vuia " Timișoara 1987.
- [B.2] BĂLĂȘOIU V. : Acționări hidraulice și pneumatice. Curs litografiat : Institutul Politehnic " Traian Vuia " Timișoara 1982.
- [B.3] BĂLĂȘOIU V. : Hidraulica sistemelor de acționare. Editura MIRTON Timișoara 1996.
- [B.4] BABUȚIA I., MUREȘAN I., DRAGOMIR T., PROSTEAN O. : Conducerea automată a proceselor. Editura Facla Timișoara 1985.
- [B.5] BLEBEA I., ISPAS V. : Calculul și construcția roboților industriali. Editura Dacia Cluj – Napoca 1995.
- [B.6] BLUMENFELD M. : Introducere în metoda elementelor finite. Editura Tehnică București 1995.
- [B.7] BOERIU P. : Hidraulica, volumul I și II: Curs litografiat Institutul Politehnic " Traian Vuia " Timișoara 1989.
- [B.8] BOGDANOV I. Microprocesorul în comanda acționărilor electrice. Editura Facla Timișoara 1989.

- [B.9] BULZAN F. Mathematic Model for Pressure Casting Operation. Revista "Robotică și Management" Nr.1/2004.
- [B10] BULZAN F. CAE Analyse in Optimizing Pressure Casting Technology. Revista "Robotică și Management".
- [C.1] *** CATALOG R.D. 29001 – Rexroth 1980 – Industrieservoventile.
- [C.2] *** CATALOG R.D. 29003 – Rexroth Hydraulik und Elektronik Komponenten fur Proportional – und Servosystemen 1986.
- [C.3] CĂLIN S., ș.a. : Conducerea adaptivă și flexibilitatea proceselor industriale. Editura Tehnică București 1988.
- [C.4] CHIRA I., ȘOFRONI L., BRABIE V. : Procedee speciale de tumare. Editura Didactică și Pedagogică București 1980.
- [C.5] COIFFET P. : Les robots Modelisation et comande. Editions Hermes, Paris 1981.
- [C.6] COIFFET P. : La robotique: Principes et aplications. Editions Hermes, Paris 1992.
- [C.7] COJOCARU GH., KOVACS FR. V. : Roboți în acțiune vol. I și II Editura Facla Timișoara 1985, 1986.
- [D.1] DAVIDOVICI A., ș.a. : Modelarea, simularea și comanda manipuloarelor și roboților industriali. Editura Tehnică București 1986.
- [D.2] DEACU L. ș.a. : Tehnica hidraulicii proporționale. Editura Dacia Cluj Napoca 1986.
- [D.3] DEMIAN T., ALEXANDRESCU N., AVRAM M. : Modelarea funcționării unităților de translație incrementete cu amplificatoare electro-hidraulice. Al 5-lea Simpozion Internațional IFTOMM – Teoria și practica mecanismelor – Syrom 89 București 1989.
- [D.4] DOLGA V. : Traductoare și senzori. Editura Facla Timișoara 1996.
- [D.5] DRĂGULESCU D. : Dinamica roboților. Editura Didactică și Pedagogică R.A. București 1997.
- [D.6] DRIMER D., ș.a. : Roboți Industriali și Manipuloare. Editura Tehnică București 1985.
- [D.7] DROSU M. : Turnătoria. Editura Tehnică București 1979.
- [D.8] DUBININ N. : Tumarea în forme metalice. Editura Tehnică București 1980.
- [E.1] ENGELBERGER J.F. : Les robots industriels. Applications, Gestion, Practique. Hermes Publ., Paris 1981.
- [F.1] FAUR N. : Elemente finite. Fundamente. Editura Politehnici, Timișoara 2002.

- [F.2] FITERO I. Mecanica fluidelor. Curs litografiat Institutul Politehnic " Traian Vuia " Timișoara 1980.
- [H.1] HUTTE : Manualul Inginerului. Fundamente. Traducere din limba germană după a 29-a ediție. Editura Tehnică București.
- [I.1] IONESCU F., ș.a. : Mecanica Fluidelor și Acționări hidraulice și pneumatice. Editura Didactică și Pedagogică București 1980.
- [I.2] IONESCU G., ș.a. : Traductoare pentru automatizări industriale. Editura Tehnică București 1985.
- [I.3] IONESCU I., ș.a. : Servovalva electrohidraulică. Editura Lux Libris Brașov 1996.
- [I.4] IONIȚĂ N. : Elemente de mecanica automatelor și dinamica automatizării proceselor tehnologice. Editura Tehnică București 1985.
- [K.1] KELEMEN A. : Acționări electrice. Editura Didactică și Pedagogică București 1985.
- [K.2] KOVÁKS FR. V., PERJU D., SAVII GH. : Metode noi în sinteza mecanismelor. Editura Facla Timișoara 1976.
- [K.3] KOVÁKS FR. V. : Considerații cu privire la arhitectura generală a roboților industriali. Primul Simpozion Național de Roboți Industriali București 1981.
- [K.4] KOVÁKS FR. V. : Contribuții la elaborarea unei terminologii de robotică. Primul Simpozion Național de Roboți Industriali București 1981.
- [K.5] KOVÁKS FR. V., COJOCARU GH. : Manipulatoare, roboți și aplicațiile lor industriale. Editura Facla Timișoara 1982.
- [K.6] KOVÁKS FR. V. : Cu privira la determinarea exactității și incertitudinii de poziționarea roboților industriali programați prin instruire. MERO 91 – București 1991.
- [K.7] KOVÁKS FR. V., RĂDULESCU C. : Roboți industriali vol. I și II. Curs litografiat Universitatea Tehnică Timișoara 1992.
- [K.8] KOVÁKS FR. V., CRUDU M., PERJU D. : Mecanisme vol. I și II. Curs litografiat Universitatea Tehnică Timișoara 1992.
- [K.9] KOVÁKS FR. V., PERJU D. : Sinteza mecanismelor. Curs litografiat Universitatea Tehnică Timișoara 1992.
- [K.10] KOVÁKS FR. V. :The " Robotic Family " Simpozion Internațional. " Teoria și practica mecanismelor ". SYROM97 București iunie 1997.

- [K.11] KOVÁKS FR. V., VARGA ŞT. TÚSZ FR. : Fabrica viitorului. Editura Multimedia Internațional Arad 1999.
- [L.1] LEBEDEV M., MELNIKOV V. : Turnarea pieselor din aliaje de aluminiu. Editura Tehnică Bucureşti 1983.
- [M.1] MANIU I., BOCHIS A. : Model matematic al unui mecanism hidraulic. Al 6-lea Simpozion Internațional. " Teoria și practica mecanismelor ". SYROM97 Bucureşti iunie 1997.
- [M.2] MANIU I. : Tipuri de sisteme de acționare ale roboților industriali și evoluția lor în timp. Al 12-lea Simpozion Național de Roboți Industriali vol. IV. Timișoara 1994.
- [M.3] MANIU I. : Sinteza optimală a sistemului de acționare hidraulic și pneumatic al roboților industriali. Teză de doctorat. Universitatea Politehnica Timișoara 1995.
- [M.4] MANIU I., DOLGA V. : Acționarea roboților industriali și a manipulatorarelor vol. I. Editura Mirton Timișoara 1996.
- [M.5] MANIU I. : Servosisteme hidraulice automate utilizate în acționarea roboților industriali. Al 13-lea Simpozion Național de Roboți Industriali Reșița 1996.
- [M.6] MANIU I. : Sisteme hidraulice și pneumatice de acționare. Editura Orizonturi Universitare Timișoara 1998.
- [M.7] MARIN V. ș.a. : Sisteme hidraulice de acționare și reglare automată. Editura Tehnică Bucureşti 1981.
- [M.8] MAZILU I., MARIN V. : Sisteme hidraulice automate. Editura Academiei Române 1982.
- [M.9] MATLAB SIMULINK 5. Users Manual. Mathworks Inc.1998.
- [N.1] NANU A. : Tehnologia materialelor. Editura Didactică și Pedagogică Bucureşti 1972.
- [O.1] OPREAN A. ș.a. : Acționări hidraulice. Editura Tehnică Bucureşti 1981.
- [O.2] OPREAN A. ș.a. : Acționări hidraulice – elemente și sisteme. Editura Tehnică Bucureşti 1982.
- [O.3] OPREAN A. ș.a. : Acționări și automatizări hidraulice. Editura Tehnică Bucureşti 1989.
- [O.4] OPREAN A. ș.a. : Echipamente hidraulice de acționare. Editura BREM Bucureşti 1998.
- [P.1] PAUL R. : Modelling Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm. Stanford The MIT Press 1977.
- [P.2] PELECUDI CHR. : Mecanisme. Editura Didactică și Pedagogică Bucureşti 1985.
- [P.3] PERJU D.: Mecanisme de mecanică fină vol. I și II. Curs litografiat Institutul Politehnic " Traian Vuia " Timișoara 1986.
- [P.4] POP I. : Noi elemente și sisteme hidraulice. Hidrologistori. Editura Academiei Române 1990.

- [P.5] POP H., ȘTEFĂNESCU D., BĂLĂȘOIU V. : Arhitectura și caracteristicile roboților industriali cu acționare hidraulică. Al 7-lea Simpozion Național de Roboți Industriali și Mecanisme Spațiale MERO'87. București 1987.
- [P.6] POPA H., ȘTEFĂNESCU D., GHEORGHIU N., KOVÁCS FR. V. Tipizarea manipuloarelor și roboților industriali cu acționare hidraulică. Al 7-lea Simpozion Național de Roboți Industriali și Mecanisme Spațiale MERO'87. București 1987.
- [P.7] *** Pro/Engineer 18.0 Documentația tehnică 1998.
- [R.1] RĂDULESCU C. : Eroarea de poziționare a robotului REMT 3. Al 8-lea Simpozion Național de Roboți Industriali. Cluj-Napoca 1988.
- [R.2] RĂDULESCU C. : Determinarea pe cale experimentală a incertitudinii de poziționare a roboților. Revista " Robotică și Management " Nr. 2 / 1990.
- [R.3] RĂDULESCU G., ALBIȚĂ G. : Rețele de turnare. Editura Tehnică București 1985.
- [S.1] SOFRONI L., BRABIE V., BRATU C. : Bazele teoretice ale turnării. Editura Didactică și Pedagogică București 1980.
- [S.2] SONTEA E., VLĂDOI M. : Metale și aliaje neferoase de turnătorie. Editura Scrisul Românesc Craiova 1981.
- [S.3] SPOREA I., A supra eficacității modificării aliajelor de tip silumin. Buletin St. și Tehnic al I.P.T., Timișoara, Fasc.1,1977, pag.115-118.
- [S.4] SPOREA I., Tehnologia materialelor. Vol. I și II. Curs litografiat Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara 1984.
- [Ș.1] ȘTEFĂNESCU C., CAZACU I. : Tehnologii de execuție a pieselor prin turnare. Editura Tehnică București 1985.
- [Ș.2] ȘTEFĂNESCU C., ȘTEFĂNESCU M. : Îndreptar pentru turnători. Editura Tehnică București 1972.
- [T.1] TRIPE VIDICAN A., Robot industrial hidraulic. Analele Universității Oradea 1983-1984.
- [T.2] TRIPE VIDICAN A., Considerente privind studiul de fiabilitate a roboților industriali cu acționare hidraulică. Al 13 -lea Simpozion Național de Roboți Industriali. Reșița 1996.
- [T.3] TRIPE VIDICAN A., Optimizarea constructivă și funcțională a manipuloarelor și roboților industriali cu acționare hidraulică. Teză de doctorat.
- [V.1] VUKOBRATOVIC M., STOKIC D. : Control of Manipulation Robots Theory and Application. Springer Verlag Berlin 1982.
- [W.1] *** www. Magmasoft.com