

# Studiul câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă

- teză de doctorat -

Conducator științific:

prof.dr.doc.șt.dhc.ing.Aurel NANU

642.435  
369 E

Ing:Mihaiela HERMAN

## CUPRINS

INTRODUCERE	6
STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRINCIPALEOR ASPECTE ALE PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ	10
1.1. Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune complexă	10
1.2. Procese elementare la prelucrarea prin eroziune complexă	11
1.3. Parametri de stare și factori de influență la prelucrarea prin eroziune complexă	11
1.4. Utilaje pentru prelucrarea prin eroziune complexă	14
1.4.1. Structura unui utilaj pentru prelucrarea prin eroziune electrică complexă	14
1.4.2. Soluții construcții tipice ale mașinilor de prelucrat prin eroziune complexă	15
1.4.3. Structuri tipice ale principalelor mașini de prelucrat prin eroziune complexă	18
1.5. Aspecte tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă	21
2. APLICAREA CONCEPTULUI SISTEMIC LA EVALUAREA CALITATIVĂ ȘI CANTITATIVĂ A PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ	23
2.1. Considerații generale privind aplicarea conceptului sistemic la evaluarea procesului de prelucrare prin eroziune complexă	23
2.2. Caracteristici tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă	24
2.3. Parametri de stare la prelucrarea prin eroziune complexă	24
2.4. Factori de influență la prelucrarea prin eroziune complexă	27
2.5. Criterii de clasificare a indicatorilor de performanță	27
2.5.1. Prezentare generală	27
2.5.2. Mărimi primare, măsurabile direct	30
2.5.3. Mărimi primare derivate, obținute prin calcul	32
2.5.4. Mărimi calitative și cantitative, în funcție de modul de exprimare	35
2.6. Concluzii privind aplicarea conceptului sistemic la evaluarea procesului de prelucrare prin eroziune complexă	35
3. CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND CONCEPTUL DE SISTEM TERMODINAMIC ȘI DE BILANȚ ENERGETIC LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ	36
3.1. Concepte fundamentale referitoare la noțiunea de energie	36
3.1.1. Terminologie și clasificare	36
3.1.2. Condiții de transformare a energiei	36

3.1.3. Exergia și anergia	38
3.1.4. Pierderi de exergie	40
3.2. Bilanțul energetic	41
3.2.1. Definiții. Scop. Clasificare	41
3.2.2. Modul de elaborare a unor bilanțuri	43
3.2.2.1. Bilanțul termoeenergetic	43
3.2.2.2. Bilanțul exergetic	43
3.2.3. Prezentarea de principiu a procesului de eroziune complexă pe baza schemelor fluxurilor tehnologice și energetice	44
3.3. Sistemul termodinamic	46
3.4. Aspecte teoretice ale transmiterii căldurii la prelucrarea prin eroziune complexă	47
3.4.1. Noțiuni generale	47
3.4.2. Conducția termică	48
3.4.2.1. Definirea conducției termice	48
3.4.2.2. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin conducție	49
3.4.3. Convecția termică	50
3.4.3.1. Definirea convecției termice	50
3.4.3.2. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin convecție	51
3.4.4. Radiația termică	51
3.4.4.1. Definirea radiației termice	51
3.4.4.2. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin radiație	53
3.5. Considerații asupra schimburilor energetice la prelucrarea prin eroziune complexă	54
3.5.1. Principiul prelucrării prin eroziune complexă în contextul schimburilor energetice	54
3.5.2. Schimbul de căldură și bilanțul termoeenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă	54
3.5.2.1. Generalități	54
3.5.2.2. Schimbul de căldură și bilanțul termoeenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă în microsistemul obiect de prelucrat OP	57
3.5.2.3. Schimbul de căldură și bilanțul termoeenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă în microsistemul obiect de transfer OT	62

3.5.2.4. Schimbul de căldură și bilanțul termoenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă în microsistemul mediu de lucru ML	64
3.6. Studiul bilanțului energetic pentru componentele sistemului termodinamic primar	66
3.6.1. Studiul bilanțului energetic pentru microsistemul obiect de prelucrat OP	66
3.6.2. Studiul bilanțului energetic pentru microsistemul obiect de transfer OT	67
3.6.3. Studiul bilanțului energetic pentru microsistemul mediu de lucru ML	68
3.6.4. Componentele bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar	68
3.6.5. Expresia analitică a componentelor bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar	70
3.6.6. Rolul factorilor de influență la prelucrarea prin eroziune complexă în determinarea bilanțului energetic	70
3.7. Noțiuni generale privind elaborarea bilanțurilor energetice la prelucrarea prin eroziune complexă cu ajutorul programelor informatice	74
4. METODE DE STUDIU A CÂMPULUI TERMIC LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ	76
4.1. Considerații generale	76
4.2. Metode de studiu a câmpului termic în sistemul termodinamic primar	78
5. ASPECTE ALE TRANSFERULUI DE CĂLDURĂ LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ	85
5.1. Componentele energiei introduse în spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune complexă	85
5.2. Analiza energiilor introduse în sistemul termodinamic primar	87
5.3. Stabilirea componentei fundamentale a energiei introduse în sistemul termodinamic primar	90
5.4. Transferul de căldură în microsistemul obiect de prelucrat	91
5.4.1. Considerații generale	91
5.4.2. Evoluția câmpului termic în diverse structuri ale microsistemului obiect de prelucrat	92
5.4.2.1. Structuri ale microsistemului obiect de prelucrat	92
5.4.2.2. Debitare - obiect de prelucrat cilindru	92
5.4.2.3. Debitare - obiect de prelucrat tubular (țeavă)	95
5.4.2.4. Realizare fante - obiect de prelucrat tubular (țeavă)	104
5.4.3. Stabilirea ecuațiilor transferului de căldură la debitarea prin eroziune complexă a unui obiect de prelucrat cilindric, cu obiectul de transfer disc	106

5.4.3.1. Considerații teoretice privind transmiterea căldurii în obiectul de prelucrat cilindru cu extindere infinită	106
<b>6. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ</b>	112
6.1. Caracteristici constructive și funcționale ale utilajului de prelucrare	112
6.2. Caracteristici ale componentelor sistemului termodinamic primar	114
6.3. Măsurarea temperaturii în sistemul termodinamic primar	117
6.3.1. Aparate de măsură	117
6.3.2. Valorile temperaturii în sistemul termodinamic primar	120
<b>7. MODELAREA CÂMPULUI TERMIC LA DEBITAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ UTILIZÂND METODA ELEMENTULUI FINIT</b>	122
7.1. Structura sistemului termodinamic primar analizat prin eroziune complexă a unui obiect de prelucrat cilindru fix cu obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare	122
7.2.1. Considerații generale	123
7.2.2. Condiții inițiale	123
7.2.3. Modelarea câmpului termic la debitarea prin eroziune complexă, în secțiune plană transversală, pentru o descărcare singulară	125
7.2.4. Modelarea câmpului termic la debitarea prin eroziune complexă, în secțiune plană transversală, pentru două descărcări simultane	146
7.2.5. Modelarea câmpului termic la debitarea prin eroziune complexă, în reprezentare spațială, pentru o descărcare singulară	150
7.3. Concluzii privind modelarea prin metoda elementului finit a câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă	152
<b>8. CONCLUZII</b>	155
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	158
<b>ANEXE</b>	167

## INTRODUCERE

A trecut ceva timp de când am pășit în mileniul III. Mult, dacă îl socotim ca mai luând o parte din anii vieții noastre, puțin dacă îl socotim ca o fărâmbă a timpului universal.

Dacă am fi fost la începutul mileniului I sau chiar la începutul mileniului II, scurgerea timpului am fi perceput-o mai lentă pentru că nu am fi trăit ritmul pe care îl trăim astăzi.

Ce ieri a fost nou, mâine s-ar putea să fie învechit. De aceea și ritmul în care noi gândim trebuie să fie foarte dinamic pentru a ține pasul ritmului general. Aceasta presupune a ieși din niște reguli, din niște tipare și a ne adapta nevoilor actuale. Cu alte cuvinte, trebuie eliminată *gândirea convențională* care presupune un consum de timp și un efort suplimentar pentru rezolvarea problemelor, deoarece concentrarea se face asupra unui lucru greșit, de cele mai multe ori asupra piedicilor ce ar putea să apară și nu asupra direcției pe care trebuie mers, a scopului final.

Dar dacă eliminăm gândirea convențională, cu ce o înlocuim?

Evident, cu *gândirea neconvențională* care schimbă centrul de interes. Conform acesteia se caută căile mai simple, directe, de rezolvare a problemelor, soluții creative, modalități noi, mai bune, care să ducă la obținerea unor rezultate mai bune.

Introducerea gândirii neconvenționale în tehnică a reprezentat un act de curaj, dar faptele au confirmat justetea adoptării unei asemenea gândiri.

Spre deosebire de gândirea comună, de toate zilele, când neconvenționalul poate elimina convenționalul, în tehnică este necesară o analiză temeinică a tuturor elementelor implicate, astfel încât adoptarea unei tehnologii neconvenționale să ducă la rezultate mai bune decât prin utilizarea, în același scop, a unei tehnologii convenționale.

Alegerea unei metode tehnologice, convenționale sau neconvenționale, este determinată de caracteristicile tehnologice ale prelucrării respective.

Asemeni oricărui domeniu, dar poate mai ales în tehnică, orice abordare, indiferent de scopul urmărit, trebuie să aibă în vedere tendința majoră și evoluția actuală, atât pe plan intern, cât și internațional. Ritmul deosebit de accelerat al dezvoltării tehnice și tehnologice, al dezvoltării aparaturii electronice de calcul, precum și a sistemelor de operare și limbajelor de programare, face ca în această etapă să nu fie posibilă o cercetare științifică fără utilizarea unor astfel de oportunități.

Există posibilitatea de a continua cercetarea în direcțiile unde, aceasta nu putea fi dusă până la obținerea unor rezultate satisfăcătoare nevoilor științei.

Se oferă astfel posibilitatea continuității cercetării acolo unde, din considerente tehnice și tehnologice, nu se poate realiza cercetarea experimentală completă care să furnizeze datele necesare verificării cercetării teoretice sau chiar datele finale pentru atingerea scopului propus.

În acest sens, modelarea fenomenelor vine să rezolve problemele de cercetare care, prin metode clasice, nu puteau fi rezolvate.

Aceste aspecte se remarcă la procesul de prelucrare prin eroziune complexă, electrică și electrochimică, proces utilizat la debitarea metalelor greu prelucrabile sau imposibil de prelucrat prin procedeele clasice, realizări de fante în piese plane sau tubulare, profilare, la ascuțirea sculelor așchietoare precum și la operații de rectificare.

De aproape o jumătate de secol, în Catedra de Tehnologie Mecanică a Facultății de Mecanică din Timișoara s-au manifestat preocupări pentru a afla tainele acestui proces de prelucrare și căile de a-l influența astfel încât rezultatele obținute să fie optime. Prin studii teoretico-experimentale ale procedurii s-au evidențiat legile fundamentale ale acestuia, rolul factorilor ce intervin în desfășurarea proceselor, modul în care aceștia pot fi dirijați pentru ca rezultatul prelucrării să îmbine, în modul cel mai avantajos, performanțele tehnice cu cele economice.

Continuând seria cercetărilor în domeniul prelucrării prin eroziune complexă, electrică și electrochimică, studiul influenței câmpului termic manifestat în timpul procesului vine să completeze, cu modeste-i contribuții, realizările pe care colectivul catedrei le are până în prezent.

În acest scop sunt analizate condițiile tehnice și tehnologice de desfășurare a procesului eroziv precum și modul în care se manifestă procesele fundamentale, elemente furnizate de studiile și cercetările anterioare. Pornind de la acestea, din sistemul în care are loc procesul tehnologic, este delimitat sistemul alcătuit din obiectul de prelucrat, obiectul de transfer și mediul de lucru, iar prin condițiile de contur ce i se impun, i se conferă caracteristicile unui sistem termodinamic.

Prin urmare, sunt stabilite condițiile studiului câmpului termic, în acest scop realizându-se:

- întocmirea bilanțului termic și a bilanțului energetic având drept obiectiv evidențierea tuturor formelor de schimb de căldură, respectiv de energie, manifestate în interiorul sistemului termodinamic considerat;
- studiul teoretic al variantelor tehnologice de lucru cu estimarea formei câmpului termic ce se manifestă în fiecare caz;
- verificarea ipotezelor emise prin modelarea câmpului termic utilizând metoda elementului finit.

Aceste direcții de abordare și cercetare ne oferă posibilitatea completării, la realizările de până acum, a următoarelor aspecte:

- căi de creștere a productivității prelucrării;
- posibilități de îmbunătățire a caracteristicilor de calitate a suprafețelor prelucrate;
- modalități de dirijare a regimurilor de lucru pentru creșterea calității și a productivității, în condiții de costuri minime.

Pentru a realiza algoritmul de mai sus, lucrarea a fost structurată astfel:

*Capitolul 1* — cuprinde, în sinteză, stadiul actual al cercetărilor în domeniul prelucrării prin eroziune complexă.

*Capitolul 2* — se aplică conceptul sistemic pentru evaluarea atât cantitativă cât și calitativă a procesului de prelucrare prin eroziune complexă.

*Capitolul 3* — pornind de la considerentele teoretice privind noțiunea de energie, la modul general și energie termică, în mod special, s-a evidențiat modul în care aceasta se poate transmite în cazul prelucrării prin eroziune complexă. Cu aceste elemente s-a realizat studiul schimbului de căldură și a bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar.

*Capitolul 4* — conține o analiză a metodelor oferite de stadiul actual al realizărilor în domeniul cercetării științifice, care să furnizeze căile de studiu al câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă.

*Capitolul 5* — analizează unele aspecte ale transferului de căldură la prelucrarea prin eroziune complexă, îndeosebi energia introdusă în sistemul termodinamic primar prin componenta fundamentală a acesteia, descărcarea electrică în impuls. Se studiază evoluția câmpului termic în diverse structuri ale microsistemului obiect de prelucrat și se stabilesc ecuațiile transferului de căldură pentru un caz particular al acestuia, în vederea determinării câmpului termic.

*Capitolul 6* — cuprinde centralizarea încercărilor experimentale realizate în vederea determinării parametrilor necesari în studiul câmpului termic.

*Capitolul 7* — prezintă modul în care s-a realizat studiul câmpului termic utilizând metoda elementului finit și rezultatele obținute.

*Capitolul 8* — centralizează concluziile ce se desprind din studiile realizate cu evidențierea contribuției personale a autorului.

Realizarea unei teze de doctorat presupune, încă din faza de enunțare a temei, pe lângă justificarea acesteia, două elemente esențiale: conducătorul științific și doctorandul. Dar munca doctorandului nu ar putea avea un rezultat viabil dacă pașii nu i-ar fi călăuziți pe cărările întortocheate ale unei astfel de activități de către conducător.

Atunci când ai privilegiul de a-ți fi conducător științific o personalitate precum este Domnul Profesor Aurel NANU, drumul parcurs pe întreaga perioadă a doctoraturii îți oferă neprețuita onoare de a-i sta în umbră și de a-i urma sfaturile, de a-i împărtăși fiecare moment de bucurie ca urmare a realizărilor, îți oferă posibilitatea de a crede mai mult în tine, de a fi mai bun.

De aceea cuvintele de mulțumire pe care aş putea acum să le adresez Domnului Prof. dr. doc. ș.t. dhc. ing. Aurel NANU sunt prea puține pentru tot ce aş dori să exprim, pentru tot ceea ce, pe parcursul pregătirii și elaborării acestei lucrări Domnia Sa a reprezentat pentru mine.



---

Se cuvine să-mi exprim recunoștința pentru sprijinul acordat de-a lungul acestor ani întregului colectiv al Catedrei de Tehnologie Mecanică, din Facultatea de Mecanică, colectiv pe care l-am simțit mereu alături și care în fiecare etapă m-a susținut.

De asemenea, adresez mulțumiri colectivului din care fac parte, Catedra de Material Rulant de Cale Ferată, unde am simțit sprijin de-a lungul întregii perioade și îngăduință în faza fierbinte a elaborării tezei.

TIMIȘOARA

Mai, 2004

Ing. Mihaela HERMAN

# 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRINCIPALELOR ASPECTE ALE PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ

## 1.1. Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune complexă

Prelucrarea prin eroziune complexă [53, 75, 85, 86, 87, 92, 98, 111, 116] reprezintă o suprapunere, concomitent cu o succesiune în timp și spațiu în zona de lucru, a acțiunilor de prelucrare prin eroziune electrochimică și prin eroziune electrică.

Pentru a realiza această suprapunere se impune o structură aparte a spațiului de lucru elementar și o adaptare a condițiilor de lucru necesare, specifice fiecărei acțiuni în parte.

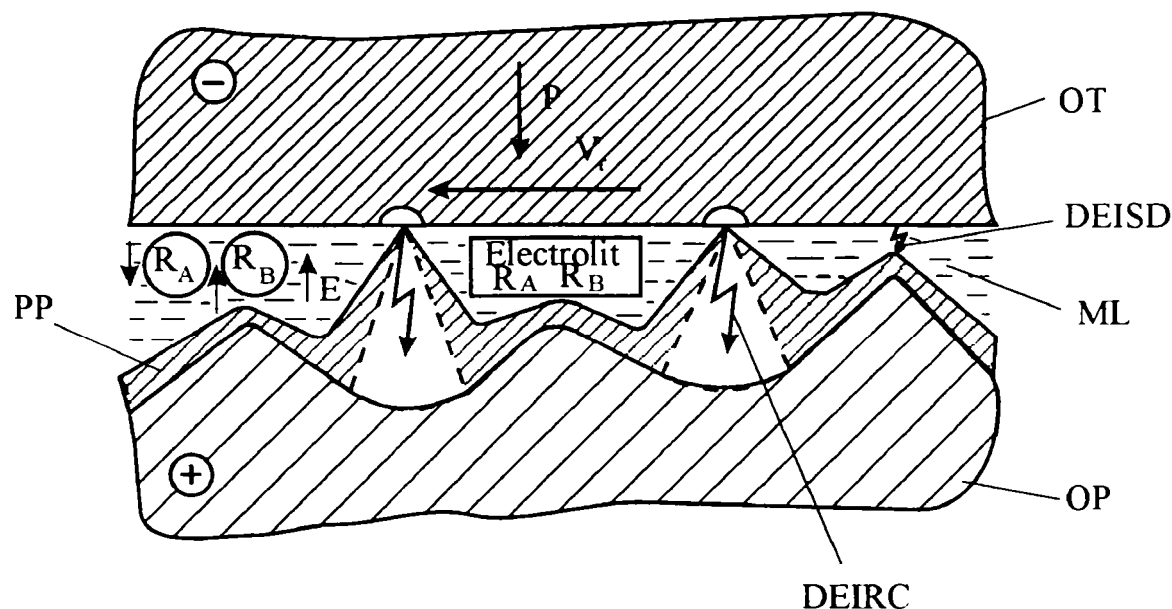


Fig. 1.1. Schema de principiu a prelucrării prin eroziune complexă

Pomind de la figura 1.1, putem defini prelucrarea dimensională prin eroziune complexă ca fiind procesul de dezvoltare simultană a dizolvării anodice DA și a descărcărilor electrice în impuls DEI, în spațiul de lucru. Acesta este delimitat de obiectul de transfer OT, conectat la borna negativă a sursei de alimentare cu curent continuu, și obiectul de prelucrat OP, conectat la borna pozitivă a aceleiași surse de alimentare cu curent continuu.

Mediul de lucru ML, cu proprietăți electroconductoare, este introdus în spațiul de lucru și în prezența câmpului electric de intensitate E determină o serie de procese anodice de decristalizare, transfer de sarcină, transport de substanță, reacții chimice etc., dintre care o parte duc la degradarea

progresivă a obiectului de prelucrat, iar altele determină formarea pe suprafața acestuia a peliculei pasivante PP, de mare rezistență mecanică și cu bune proprietăți dielectrice.

Obiectul de transfer OT sau electrodul sculă (catod), este elementul care realizează localizarea macroscopică a eroziunii. La un moment dat, grosimea peliculei pasivante PP atinge o valoare care determină oprirea procesului de dizolvare anodică, provocând astfel pasivizarea anodului.

Pentru a se putea asigura continuitatea procesului de dizolvare anodică, se realizează deplasarea tangențială a obiectului de transfer OT pe suprafața obiectului de prelucrat OP cu viteza  $v_r$ , asigurându-se în același timp presiunea de contact  $p$  între cei doi electrozi (OP și OT). Această solicitare mecanică determină, la nivelul vârfurilor microasperităților, îndepărtarea peliculei pasivante. Se creează astfel condițiile necesare apariției descărcărilor electrice în impuls (DEI).

Descărcările electrice în impuls DEI prezente în spațiul de lucru sunt amorsate între obiectul de transfer OT și obiectul de prelucrat OP, în condițiile existenței peliculei pasivante PP, a dizolvării anodice DA, a filmului de electrolit, a existenței în suspensie a unor cantități de produse ale eroziunii. Ele se pot genera fie prin ruperea contactelor metalice parcurse de curent – descărcări electrice în impuls prin rupere de contact DEIRC, fie prin străpungerea dielectricului – descărcări electrice în impuls prin străpungerea dielectricului DEISD.

La creșterea puterii specifice introduse în spațiul de lucru, prelevarea de material se datorează aproape în exclusivitate efectului termic al descărcărilor electrice.

Concentrările locale de energie supun materialul la solicitări termice mari și, ca urmare, în afara unui efect eroziv pronunțat, apar și solicitări metalurgice care duc la apariția unor straturi modificate termic, cu caracteristici speciale.

## **1.2. Procese elementare la prelucrarea prin eroziune complexă**

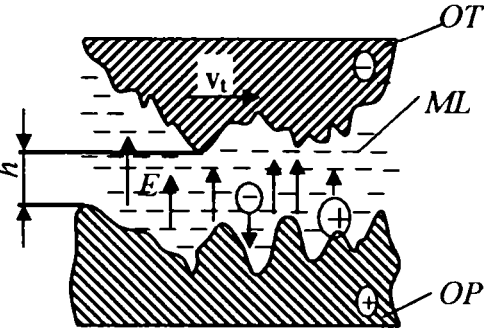
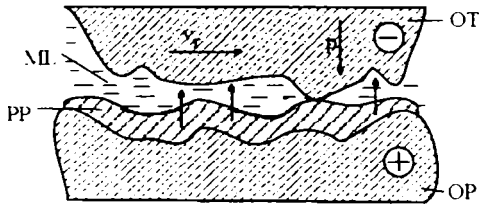
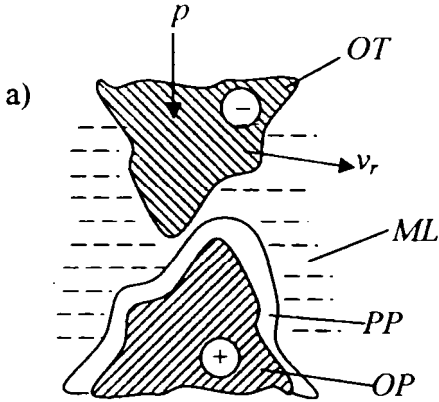
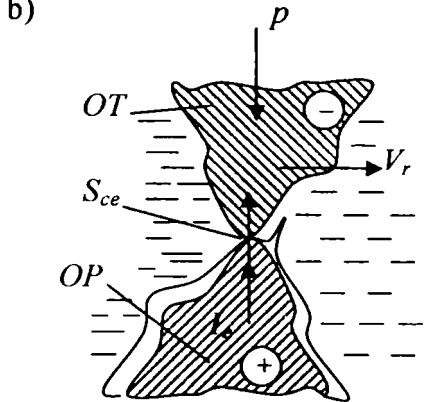
Sintetizând, într-o formă particulară, rezultatele cercetărilor anterioare, consemnate în literatura de specialitate [53, 75, 85, 86, 87, 92, 98, 111], succesiunea etapelor de desfășurare a proceselor elementare se prezintă în tabelul 1.1.

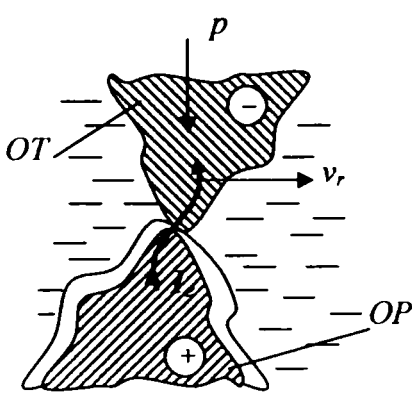
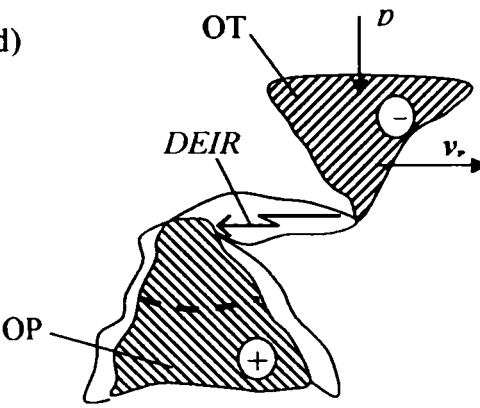
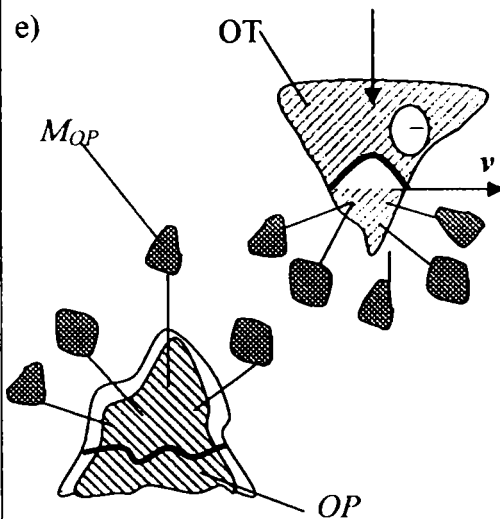
## **1.3. Parametri de stare și factori de influență la prelucrarea prin eroziune complexă**

Principalele procese la prelucrarea prin eroziune complexă se desfășoară în interiorul sistemului delimitat de obiectul de prelucrat, mediul de lucru și obiectul de transfer și sunt influențate de o serie de parametri și factori care acționează simultan, într-o strânsă și continuă dependență.

Tabelul 1.1

Etapele de desfășurare a proceselor elementare la prelucrarea prin eroziune complexă

Nr. crt.	Etapa	Definirea etapei	Reprezentarea etapei	Efect
1	Dizolvarea anodică	Trecerea materialului din care este confecționat anodul în soluție	<p>a) Starea inițială a microsistemului</p>  <p>b) Starea finală a microsistemului</p> 	Formarea peliculei pasivante
2	Descărcarea electrică în impuls prin rupere de contact (DEIRC)	<p>Generarea descărcărilor electrice în impuls prin ruperea contactelor metalice:</p> <p>a) Îndepărtarea peliculei pasivante PP de e obiectul de prelucrat OP de către microasertițiile obiectului de transfer OT;</p> <p>b) Realizarea unui microcontact metallic de suprafață <math>S_{ce}</math> prin care trece curentul elementar <math>I_e</math>;</p>	<p>a)</p>  <p>b)</p> 	Expulzarea în mediul de lucru și, odată cu acesta, evacuarea materialului metallic vaporizat și topit, datorită fenomenelor termice dezvoltate.

		<p>c) Reducerea suprafeței de contact dintre obiectul de transfer și obiectul de prelucrat până la anulare, prin deplasarea lor relativă cu viteza <math>v_r</math>;</p> <p>d) Amorsarea descărcării electrice în impuls prin rupere de contact;</p> <p>e) Stingerea prin explozie a descărcării electrice în impuls prin rupere de contact;</p>	<p>c) </p> <p>d) </p> <p>e) </p>	
<p>3.</p>	<p>Descărcare electrică în impuls prin străpungerea dielectricului (DEISD)</p>	<p>Transformarea foarte concentrată, în unele porțiuni ale spațiului de lucru, a energiei electrice în energie termică</p>		<p>Expulzarea în mediul de lucru și, odată cu acesta, evacuarea materialului metalic vaporizat și topit, datorită fenomenelor termice dezvoltate.</p>

Pornind de la datele oferite de literatura de specialitate [50, 51, 53, 54, 56, 57, 63, 64, 66, 75, 85, 86, 87, 92, 98, 111, 132], s-a realizat o abordare originală a parametrilor de stare și a factorilor de influență, incluzând precizarea clară a sensului celor două noțiuni precum și sistematizarea acestora și prezentarea lor într-o structură sintetică.

Prelucrarea prin eroziune complexă îmbină avantajele prelucrării prin eroziune electrochimică cu cele ale prelucrării prin eroziune electrică, în scopul obținerii unor caracteristici tehnologice optime pentru produsele obținute prin acest procedeu.

Caracteristicile tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă sunt influențate de un număr mare de factori ce intervin în procesul de prelucrare. Ponderea acestora este diferită dar ei acționează simultan și în strânsă interdependență.

Factorii care influențează procesul de prelucrare prin eroziune complexă pot fi: electrici, mecanici, factori determinați de elementele sistemului termodinamic (obiect de transfer, obiect de prelucrat, mediu de lucru), factori determinați de sistemul tehnic (instalația de prelucrare), factori determinați de tipul prelucrării, de operatorul uman, de mediul înconjurător.

## 1.4. Utilaje pentru prelucrarea prin eroziune complexă

### 1.4.1. Structura unui utilaj pentru prelucrarea prin eroziune complexă

Prelucrarea prin eroziune complexă fiind un proces complex, o verigă importantă a unor procese tehnologice diverse, determină o diversitate typoconstructivă și funcțională a utilajelor specifice, conform criteriilor de clasificare prezentate în tabelul 1.2.

Tabelul 1.2.

Clasificarea utilajelor pentru prelucrarea prin eroziune complexă		
Nr. crt.	Criteriul de clasificare	Tipul utilajului
0	1	2
1	Tipul operației tehnologice	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ de debitat;</li> <li>❖ de ascuțit;</li> <li>❖ de profilat;</li> <li>❖ pentru realizarea fantelor.</li> </ul>
2.	Forma constructivă a obiectului de transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ cu obiect de transfer disc;</li> <li>❖ cu obiect de transfer bandă;</li> <li>❖ cu obiect de transfer fir.</li> </ul>

0	1	2
3.	Tipul avansului	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ cu avans manual;</li> <li>❖ cu avans mecanic constant;</li> <li>❖ cu avans automat: <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ electromecanic;</li> <li>❖ mecanic;</li> <li>❖ hidraulic;</li> <li>❖ pneumatic etc.</li> </ul> </li> </ul>
4.	Destinație	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ universale;</li> <li>❖ specializate.</li> </ul>

Indiferent de criteriul de clasificare utilizat, utilajele destinate prelucrării prin eroziune complexă trebuie să conțină sistemele funcționale prezentate în figura 1.2 [53, 68, 75, 87, 98, 111, 113], sisteme care pot fi unități separate sau înglobate într-o construcție unitară.

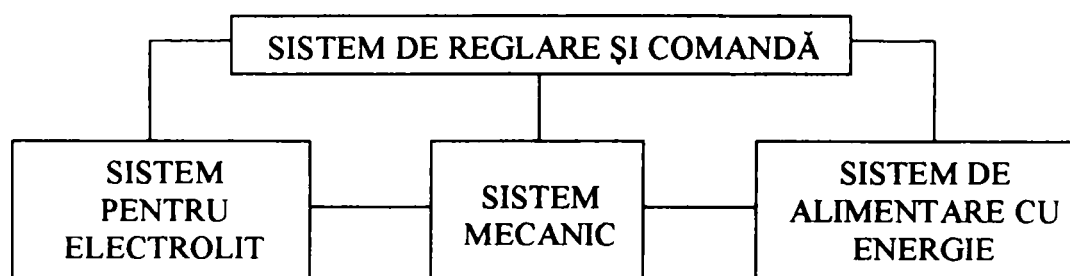


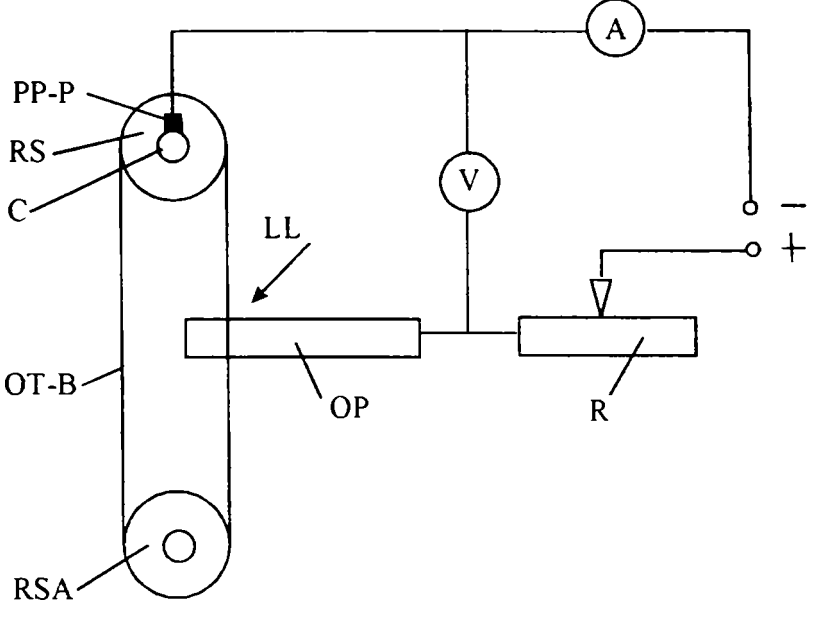
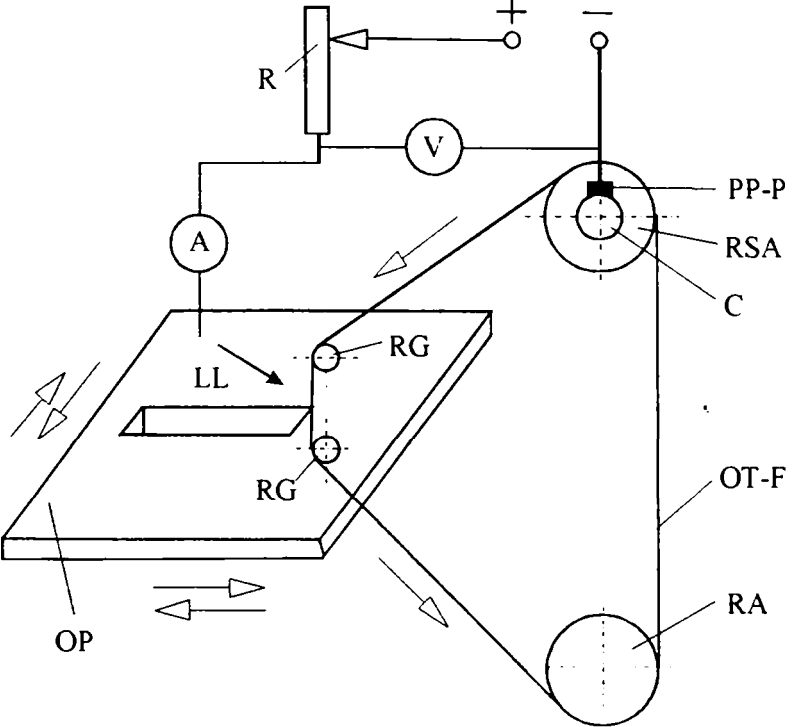
Fig. 1.2. Sistemele funcționale ale unui utilaj de prelucrare dimensională prin eroziune complexă

#### 1.4.2. Soluții constructive tipice ale mașinilor de prelucrat prin eroziune complexă

Schemele principale ale diferitelor operații de prelucrare prin eroziune complexă [53, 68, 75, 87, 98, 111, 113] sunt prezentate în tabelul 1.3.

Tabelul 1.3

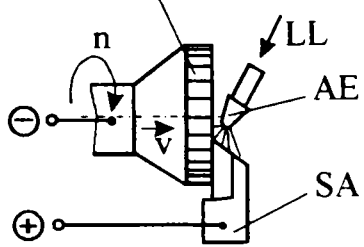
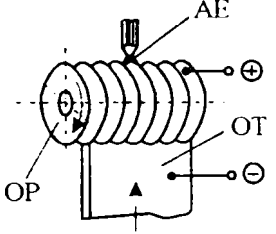
Construcții tipice ale mașinilor de prelucrat prin eroziune complexă

Nr. crt.	Soluții constructive în funcție de tipul prelucrării	Simboluri
0 1	<p style="text-align: center;">1</p> <p style="text-align: center;"><i>Prelucrarea cu electrod bandă</i></p> 	<p style="text-align: center;">2</p> <p>OT-B – obiect de transfer bandă;                  OP – obiect de prelucrat;                  RS – rolă de sprijin;                  PP-P – sistem portperieperie;                  C – colector;                  A – ampermetru;                  V – voltmetru;                  LL – lichid de lucru;                  R – rezistență variabilă;                  RSA – rola de sprijin și antrenare.</p>
2	<p style="text-align: center;"><i>Prelucrarea profilată după contur cu electrod filiform</i></p> 	<p>OT-F – obiect de t. ansfe. filiform;                  OP – obiect de prelucrat;                  RS – rolă de sprijin;                  PP-P – sistem portperieperie;                  C – colector;                  A – ampermetru;                  V – voltmetru;                  LL – lichid de lucru;                  R – rezistență variabilă;                  RA – rola de antrenare;                  RG – role de ghidare.</p>



0	1	2
3	<p><i>Prelucrarea cu obiect de transfer disc</i></p>	<p>OT – obiect de transfer disc;                      OP – obiect de prelucrat;                      PP-P – sistem portperieperie;                      A – ampermetru;                      V – voltmetru;                      LL – lichid de lucru;                      R – rezistență variabilă;                      n – turația obiectului de transfer.</p>
4	<p><i>Realizarea fantelor înguste în piese tubulare</i></p>	<p>OT – obiect de transfer multiplu;                      D – discuri;                      OP – obiect de prelucrat;                      A – arbore;                      LL – lichid de lucru;                      Pi – piuliță;                      D – d stanț er;                      vt – viteză transversală;                      n – turația obiectului de transfer.</p>
5	<p><i>Realizarea fantelor înguste în piese plane</i></p>	<p>OT – obiect de transfer disc;                      OP – obiect de prelucrat;                      PP-P – sistem portperieperie;                      A – ampermetru;                      V – voltmetru;                      LL – lichid de lucru;                      R – rezistență variabilă;                      n – turația obiectului de transfer;                      vt – viteză transversală,                      va – viteză de avans.</p>

642.435  
 369 E

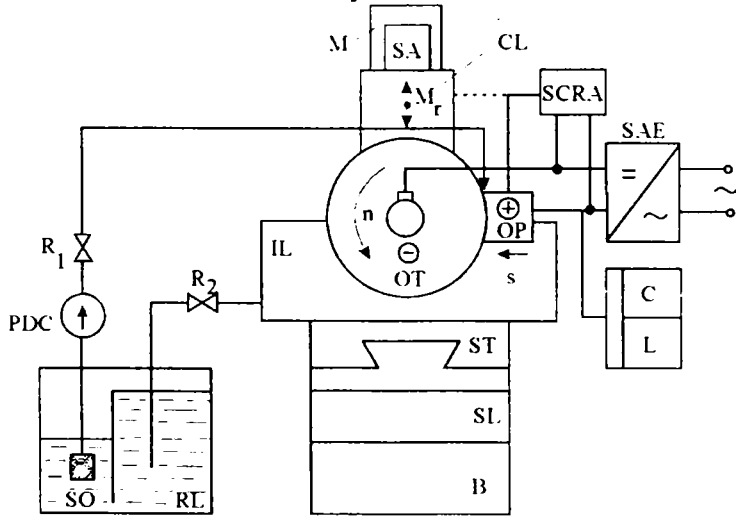
0	1	2
6	<p><i>Rectificarea (ascuțirea) sculelor așchietoare sau rectificarea suprafețelor plane sau profilate</i></p> 	<p>DR (OT) – obiect de transfer; SA – sculă așchietoare; LL – lichid de lucru; n – turația obiectului de transfer; AE – alimentare cu electrolit; v – viteza de avans.</p>
7	<p><i>Prelucrarea suprafețelor profilate la corpuri de revoluție</i></p> 	<p>OT – obiect de transfer; OP – obiect de prelucrat; AE – alimentare cu electrolit.</p>

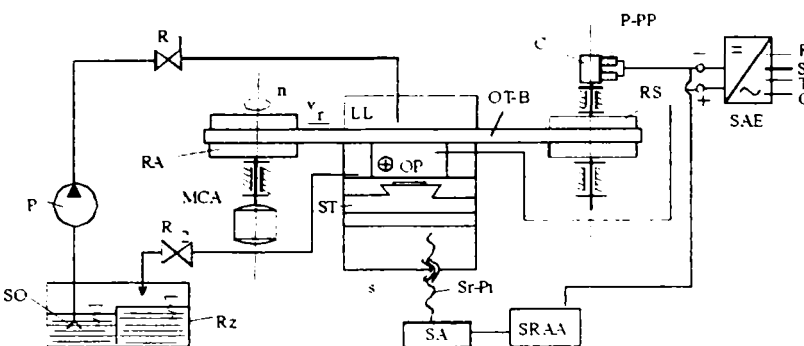
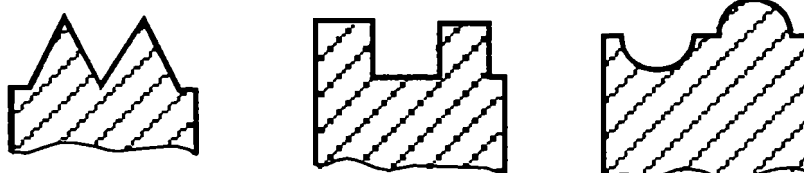
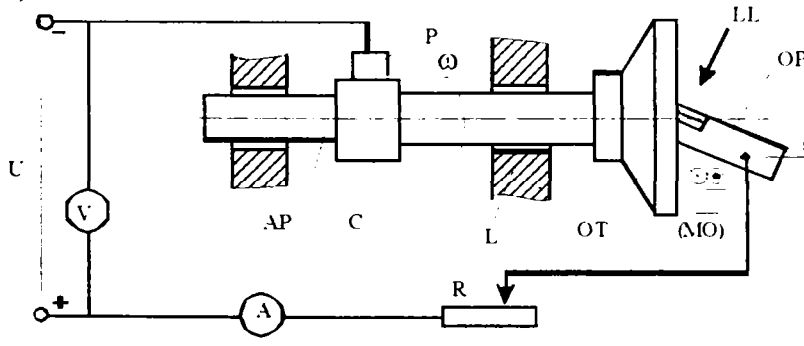
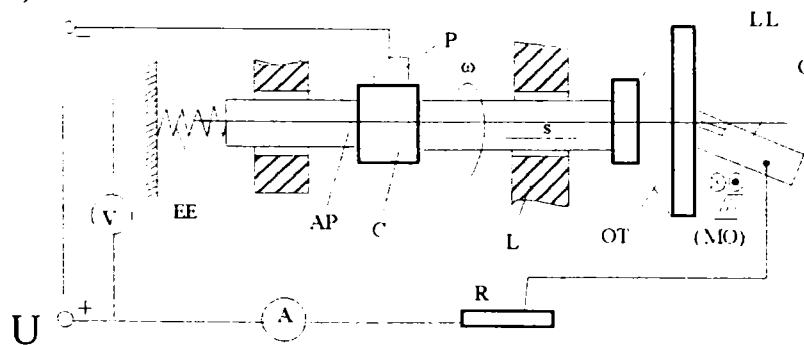
### 1.4.3. Structuri tipice ale principalelor mașini de prelucrat prin eroziune complexă

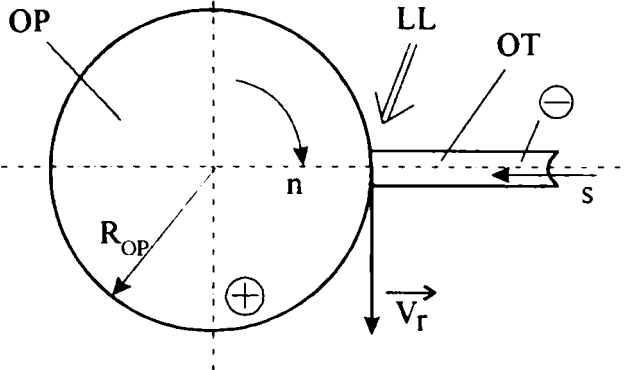
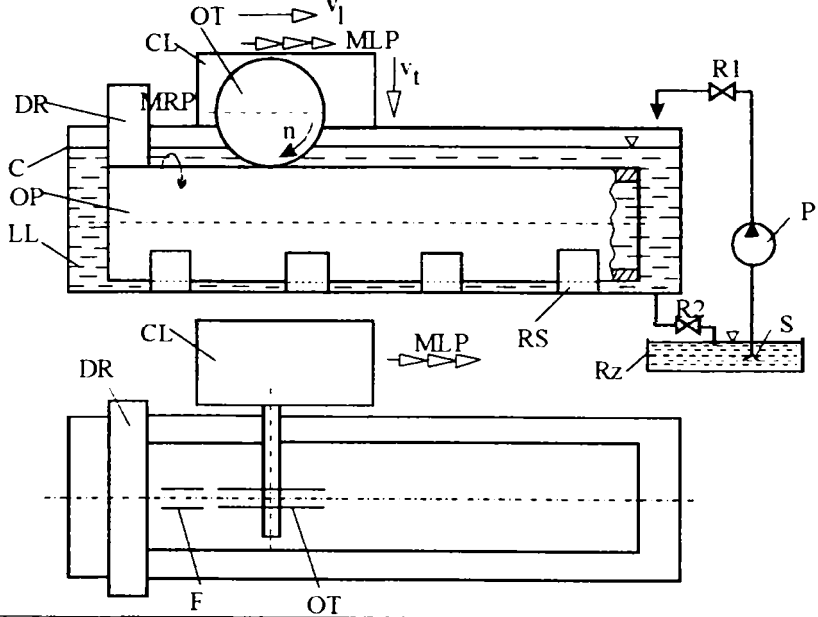
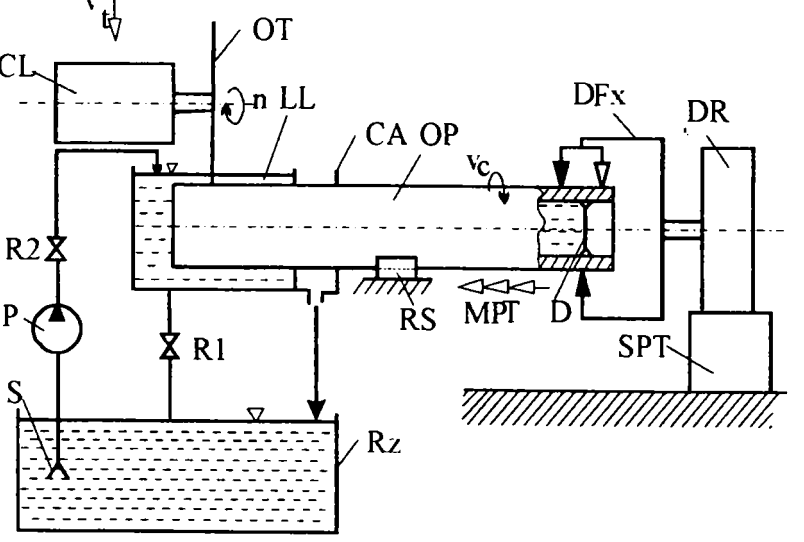
Principalele structuri tipice ale mașinilor de prelucrat prin eroziune complexă [53, 68, 75, 87, 98, 111, 113] sunt prezentate în tabelul 1.4.

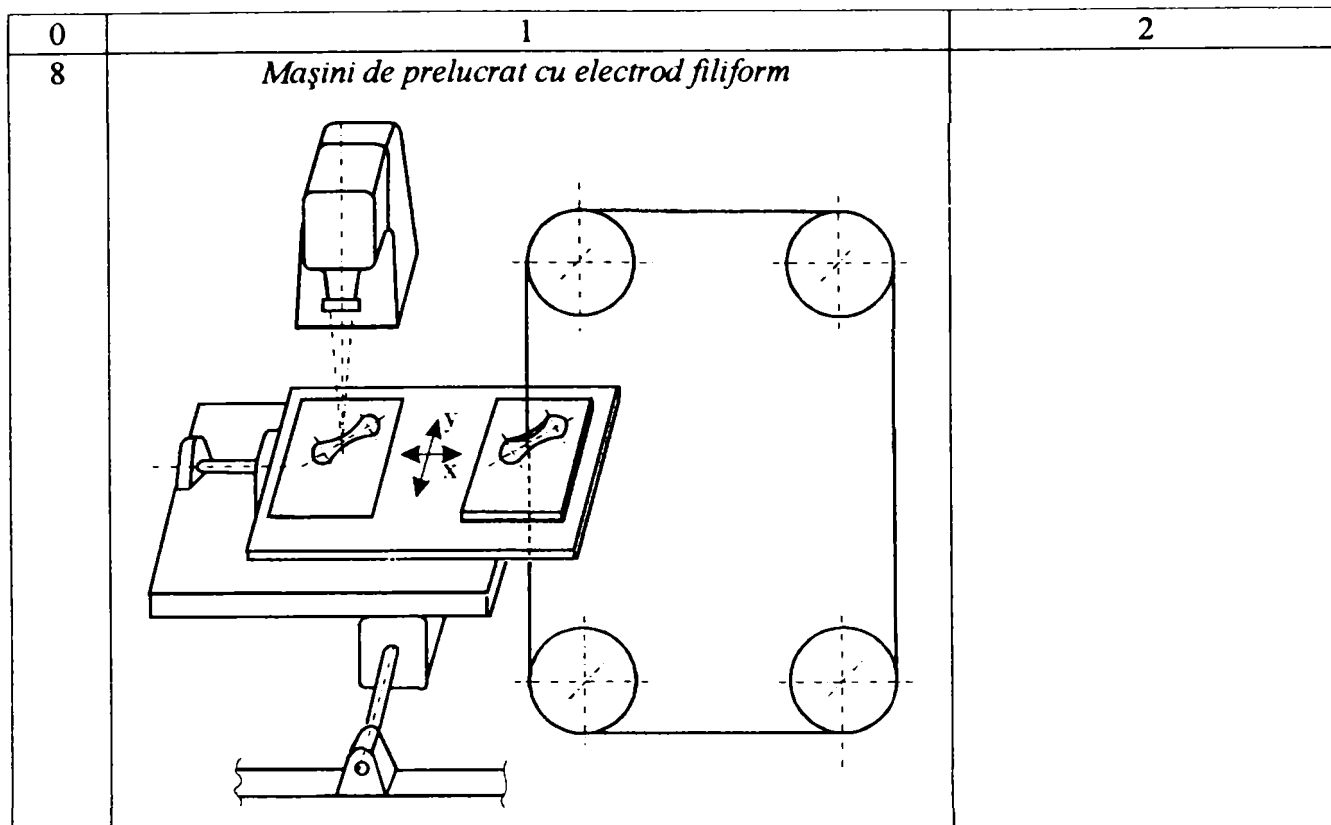
Tabelul 1.4

Structuri tipice ale mașinilor de prelucrat prin eroziune complexă

Nr. crt.	Soluția constructivă	Simboluri
0	1	2
1	<p><i>Mașina de debitat prin eroziune complexă cu obiect de transfer disc</i></p> 	<p>B – batiu; SL – sanie longitudinală; ST – sanie transversală; IL – incinta de lucru; M – montant; SA – sistem de antrenare; SCRA – sistem de comandă și reglare a avansului; SAE – sistem de alimentare cu energie; C, L – blocuri de capacități și inductivități; PDC – pompa cu debit constant; SO – sorb; RL – rezervor de lichid; R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – robinete; M<sub>r</sub> – mișcare de reglare a capului de lucru; OT – obiect de transfer; OP – obiect de prelucrat; s – mișcare de avans; n – turația obiectului de transfer; CL – cap de lucru.</p>

0	1	2
2	<p><i>Mașina de debitat prin eroziune complexă cu obiect de transfer bandă</i></p> 	<p>RS – rolă de sprijin;                  RA – rolă de antrenare;                  C – colector;                  P-PP – sistem perie portperie;  <math>v_r</math> – viteza relativă a d.n. obiectului de prelucrat și a transferului;                  MCA – motor de curent alternativ;                  ST – sanie transversală;                  LL – lichid de lucru;                  SA – sistem de antrenare;                  SRAA – sistem de reglare automată a avansului;                  SAE – sistem de alimentare cu energie;                  P – pompă;                  Rz – rezervor de lichid;                  R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – robinete;                  SO – sorb;                  OT-B – obiect de transfer bandă;                  OP – obiect de prelucrat;                  s – mișcare de avans;                  n – turația rolei de antrenare;</p>
3	<p><i>Mașini pentru profilarea prin eroziune complexă</i></p> 	
4	<p><i>Mașini pentru ascuțirea sculelor așchietoare prin eroziune complexă</i></p> <p>a)</p>  <p>b)</p> 	<p>OT – obiect de transfer;                  OP – obiect de prelucrat (sculă așchietoare);                  P – sistem portperie-perie;                  C – colector;                  A – ampermetru;                  V – voltmetru;                  R – rezistență variabilă;                  LL – lichid de lucru;                  s – mișcarea de avans;                  MO – mișcarea de oscilație;                  AP – arbore principal;                  L – lagăr;  <math>\omega</math> – mișcarea de rotație;                  EE – element elastic.</p>

0	1	2
5	<p><i>Mașini pentru prelucrarea prin eroziune complexă a corpurilor de revoluție</i></p> 	<p>OT – obiect de transfer;                      OP – obiect de prelucrat;                      LL – lichid de lucru;                      s – mișcarea de avans;  <math>R_{OP}</math> – raza obiectului de prelucrat;                      n – turația obiectului de prelucrat;  <math>v_r</math> – viteza tangențială a obiectului de prelucrat.</p>
6	<p><i>Mașini pentru realizarea fantelor longitudinale în semifabricate tubulare</i></p> 	<p>OT – obiect de transfer;                      OP – obiect de prelucrat;                      LL – lichid de lucru;                      C – cuva de lucru;                      CL – capul de lucru;                      MLP – mișcare de poziționare;                      RS – role de sprijin;                      MRP – mișcarea de rotație de poziționare;                      DR – dispozitivul de rotire și divizare;                      Rz – rezervorul;                      S – sorb;                      R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – robinete;                      P – pompa centrifugală                      F – fante;  <math>v_l</math> – mișcare de avans longitudinal;                      n – turația obiectului de transfer.</p>
7	<p><i>Mașini de debitat țevi cu diametrul mare</i></p> 	<p>OT – obiect de transfer disc;                      n – turația obiectului de transfer;                      CL – capul de lucru;                      C – cuva de lucru;                      CA – cuva auxiliară;                      RS – role de sprijin pentru obiectul de prelucrat;                      DFx – dispozitiv de fixare a semifabricatului tubular OP;                      D – dop;                      DR – dispozitiv de rotire a obiectului de prelucrat;                      SPT – sistem de asigurare a avansului de poziționare transversal MPT;                      Rz – rezervor pentru stocarea lichidului de lucru;                      S – sorb;                      P – pompă centrifugă;                      R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> – robinete pentru reglarea debitului lichidului de lucru;  <math>v_c</math> – mișcarea de avans circular.</p>



### 1.5. Aspecte tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă

La elaborarea procesului tehnologic de prelucrare dimensională prin eroziune complexă [53, 68, 75, 87, 98, 111, 113] se au în vedere următoarele elemente:

- caracteristicile constructive și dimensionale ale piesei care urmează a fi prelucrată;
- materialul obiectului de prelucrat;
- condițiile de precizie dimensională și de formă impuse;
- rugozitatea suprafețelor prelucrate;
- utilajul tehnologic de prelucrare disponibil.

Proiectarea tehnologiei de prelucrare impune parcurgerea mai multor etape, conform tabelului 1.5.

Tabelul 1.5

Etapele proiectării tehnologiei de prelucrare prin eroziune complexă

Etapa	Condiții de realizare
1	2
Alegerea utilajului tehnologic de prelucrare	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ posibilitățile tehnologice pe care le poate oferi;</li> <li>▪ forma și dimensiunile pieselor;</li> <li>▪ mărimea suprafețelor de prelucrat.</li> </ul>

1	2
Stabilirea sistemului de alimentare cu lichid de lucru	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ utilizarea, aproape exclusiv, a soluției de silicat solubil de sodiu (<math>\text{Na}_2\text{O}</math> n <math>\text{SiO}_2</math>) cu o densitate = <math>1,1 \dots 1,25 \text{ g/cm}^3</math> și un modul <math>M = 2,8 \dots 3,2</math>;</li> <li>▪ introducerea lichidului de lucru în spațiul de lucru se poate face prin:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ jet;</li> <li>▪ imersie (sistemul de alimentare cu lichid de lucru este prevăzut cu pompe adecvate pentru umplerea rapidă a cuvei de lucru și cu un sistem de pompe pentru menținerea constantă a nivelului lichidului de lucru în timpul procesului de prelucrare).</li> </ul> </li> </ul>
Stabilirea densității de curent	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ se recomandă densități de curent de <math>1,5 \dots 3 \text{ A/mm}^2</math>.</li> </ul>
Stabilirea curentului de prelucrare și a tensiunii optime pe spațiul de lucru	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ dacă condițiile de prelucrare se încadrează în condițiile restrictive impuse pentru determinarea unor modele matematice, se recomandă utilizarea funcțiilor respective;</li> <li>▪ în caz contrar, se calculează curentul de prelucrare <math>I</math> cu relația <math>I = j \cdot S \text{ [A]}</math> (<math>j \text{ [A/mm}^2]</math> – densitatea de curent; <math>S</math> – aria de interacțiune între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer), iar tensiunea pe spațiul de lucru se recomandă în intervalul <math>20 \div 28 \text{ V}</math>, în funcție de mărimea suprafeței active de contact.</li> </ul>
Stabilirea naturii circuitului electric de alimentare	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ rezistențele electrice introduse în circuit au rolul de a modifica caracteristica externă a sursei de alimentare, respectiv limitarea curenților maximi de scurtcircuit (introducerea lor are un efect energetic negativ, de aceea trebuie bine analizată oportunitatea introducerii lor);</li> <li>▪ capacitățile introduse au un efect global negativ, înrăutățind, în general, calitatea suprafeței;</li> <li>▪ inductivitățile au cea mai mare influență asupra caracteristicilor tehnologice (îmbunătățirea calității suprafețelor fără afectarea productivității, scăderea turației obiectului de transfer, îmbunătățirea calității stratului superficial etc.).</li> </ul>
Stabilirea vitezei periferice a obiectului de transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pentru circuitele de alimentare nemodificate din punct de vedere electric (fără capacități sau inductivități suplimentare), viteza relativă optimă între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer este <math>v_r = 20 \div 25 \text{ m/s}</math>;</li> <li>▪ în cazul introducerii inductivităților, viteza relativă poate coborî până la valori de <math>v_{r \text{ min}} = 2 \text{ m/s}</math>.</li> </ul>
Stabilirea materialului, a modului de obținere și a preciziei obiectului de transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ se preferă ca material pentru obiectul de transfer oțelul, care, deși are o uzură relativ ridicată, prin costul redus compensează acest defect (în cazuri excepționale se poate analiza oportunitatea realizării obiectului de transfer din cupru, alamă sau fontă, care realizează o creștere a indicatorilor de performanță ai prelucrării, însă au un cost foarte ridicat);</li> <li>▪ referitor la modul de obținere a obiectului de transfer – disc se recomandă utilizarea ștanțării obișnuite, eventual cuplată cu operații suplimentare de îndreptare (planare).</li> </ul>
Stabilirea presiunii OP/OT	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ în funcție de natura perechii de materiale obiect de prelucrat – obiect de transfer, de mărimea zonei de interacțiune dintre cele două obiecte, presiunea se alege în limitele <math>0,1 \div 0,3 \text{ N/mm}^2</math>.</li> </ul>

## 2. APLICAREA CONCEPTULUI SISTEMIC LA EVALUAREA CALITATIVĂ ȘI CANTITATIVĂ A PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ

### 2.1. Considerații generale privind aplicarea conceptului sistemic la evaluarea procesului de prelucrare prin eroziune complexă

În procesul de prelucrare prin eroziune complexă fenomenele fundamentale se desfășoară în cadrul unui subsistem termodinamic alcătuit din obiectul de prelucrat, obiectul de transfer și mediul de lucru. Acesta nu poate fi însă analizat decât în strânsă corelație cu celelalte subsisteme ale sistemului termodinamic general, ținând seama de interdependențele constructive și funcționale dintre ele (Fig. 2.1).

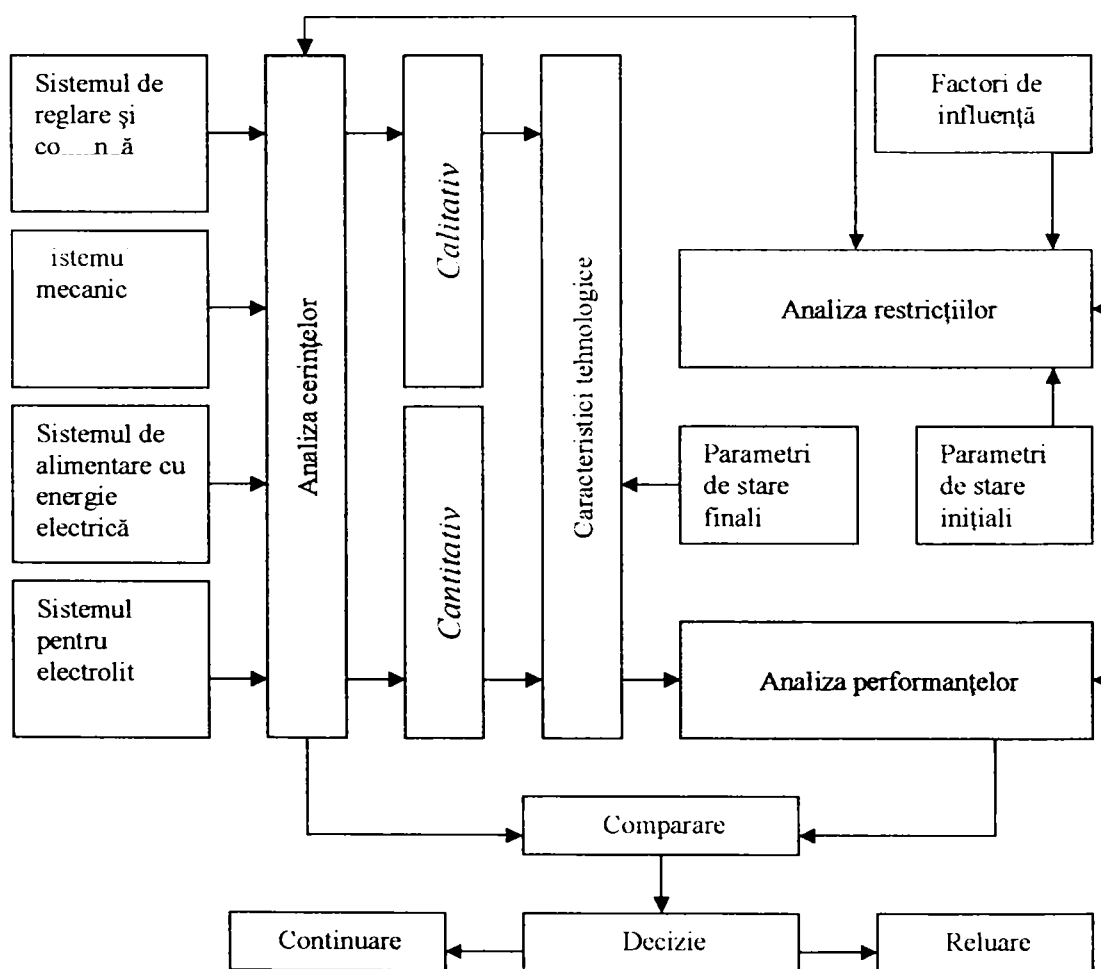


Fig.2.1. Conceptul sistemic la evaluarea procesului de prelucrare prin eroziune complexă

O analiză globală a procesului de prelucrare prin eroziune complexă, și originală în același timp, se poate realiza urmând trei direcții principale:

- *analiza cerințelor*, din prisma sistemelor funcționale ale utilajelor de prelucrat prin eroziune complexă (sistemul de reglare și comandă, sistemul pentru electrolit, sistemul mecanic, sistemul de alimentare cu energie);
- *analiza restricțiilor*, urmărind aspectele tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă;
- *analiza performanțelor* sistemului conceput care are în vedere *indicatorii de performanță*, adică acele variabile ce exprimă cantitativ și calitativ transformările suferite de către componentele materiale ale procesului precum și o serie de criterii care să reprezinte cât mai sintetic și relevant desfășurarea și performanțele procesului.

Materializarea cerințelor, restricțiilor și performanțelor la prelucrarea prin eroziune complexă se poate realiza prin caracteristicile tehnologice, parametri de stare și factorii de influență ai procesului, într-o strânsă corelație și cu o dispersie deloc întâmplătoare.

## **2.2. Caracteristici tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă**

Scopul oricărei prelucrări este de a realiza un produs, nu oricum, ci un produs ale cărui calități să-l facă performant, încorporând în el rodul gândirii, al concepției, al transformărilor tehnologice, toate la un nivel cât mai înalt.

Calitatea unui produs este exprimată prin prisma caracteristicilor tehnologice.

În cazul prelucrării prin eroziune complexă, caracteristicile tehnologice sunt acele variabile ce exprimă cantitativ și calitativ transformările suferite de către obiectul de prelucrat și obiectul de transfer în urma procesului de prelucrare. Figura 2.2 redă schematizat principalele caracteristici tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă, grupate în patru mari categorii.

Caracteristicile tehnologice sunt exprimate prin mai mulți parametri și sunt influențate de o serie de factori, astfel încât sensul celor două noțiuni este deosebit de evident: parametrul este o mărime proprie unui obiect ce servește la caracterizarea unor proprietăți ale sale iar factorul reprezintă o condiție care determină apariția unui proces, a unui fenomen, precum și desfășurarea acestuia.

## **2.3. Parametri de stare la prelucrarea prin eroziune complexă**

Sistemul termodinamic în care se desfășoară procesele fundamentale la prelucrarea prin eroziune complexă, pentru a putea fi analizat, trebuie considerat în stare de echilibru termodinamic



care se exprimă cu ajutorul unor mărimi macrofizice, numite *mărimi de stare* sau *parametri de stare*.

Mărimile de stare ale căror valori sunt independente de masa sistemului (temperatura, presiunea) reprezintă *parametri intensivi*. Mărimile ce depind de masa sistemului (volumul ocupat) sunt *parametri extensivi*.

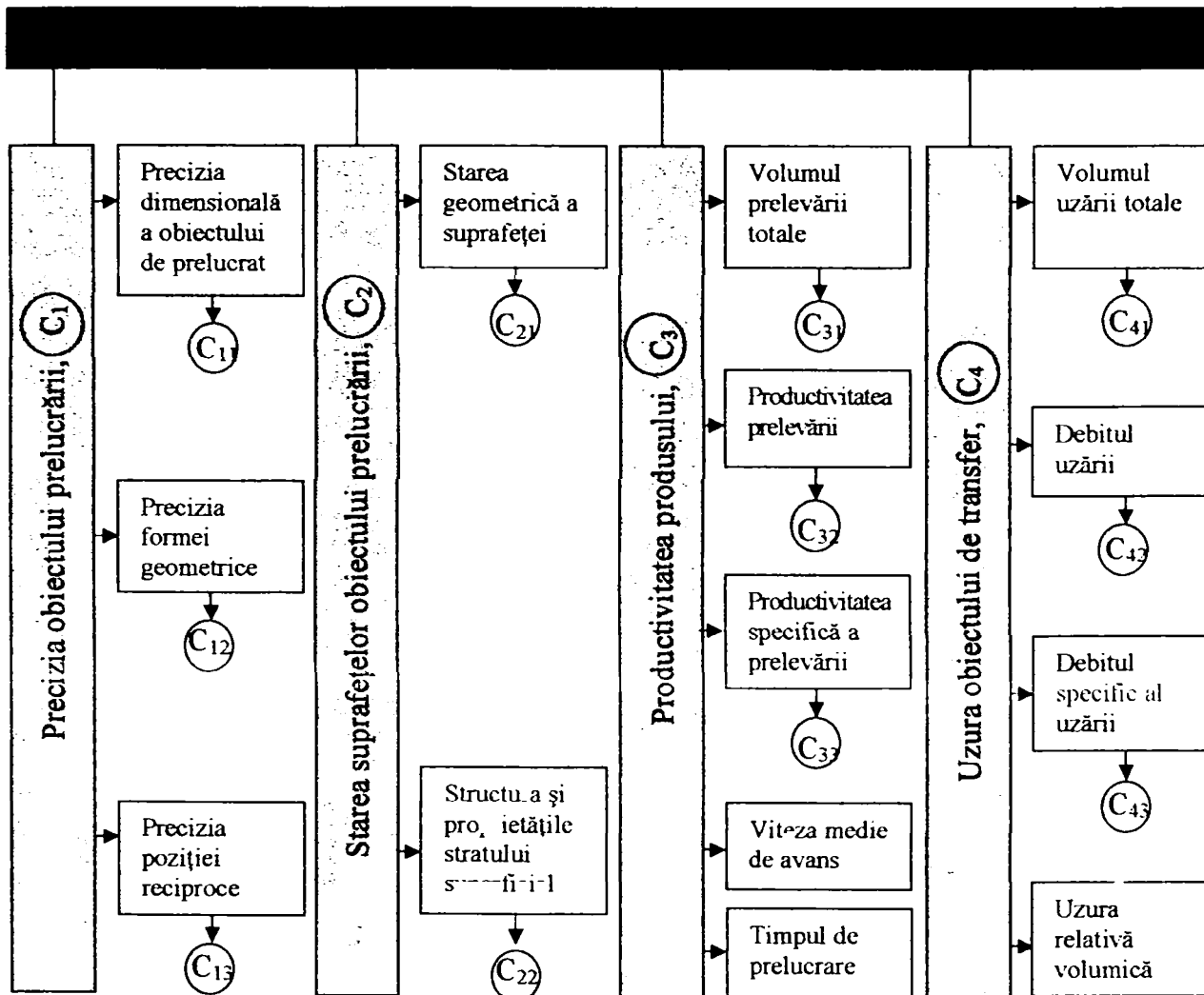


Fig. 2.2. Caracteristicile tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă

Conform unui alt criteriu de abordare, parametrii ce depind de mișcarea particulelor sistemului și de distribuția lor în spațiu se numesc *parametri interni*, iar parametrii determinați de poziția corpurilor exterioare sistemului considerat se numesc *parametri externi*.

În figura 2.3 sunt sintetizați parametrii de stare ai sistemului termodinamic la prelucrarea prin eroziune complexă.

Valorile parametrilor de stare depind numai de starea momentană a sistemului, fiind independente de transformările intermediare suferite de acesta pentru a ajunge la starea de echilibru.

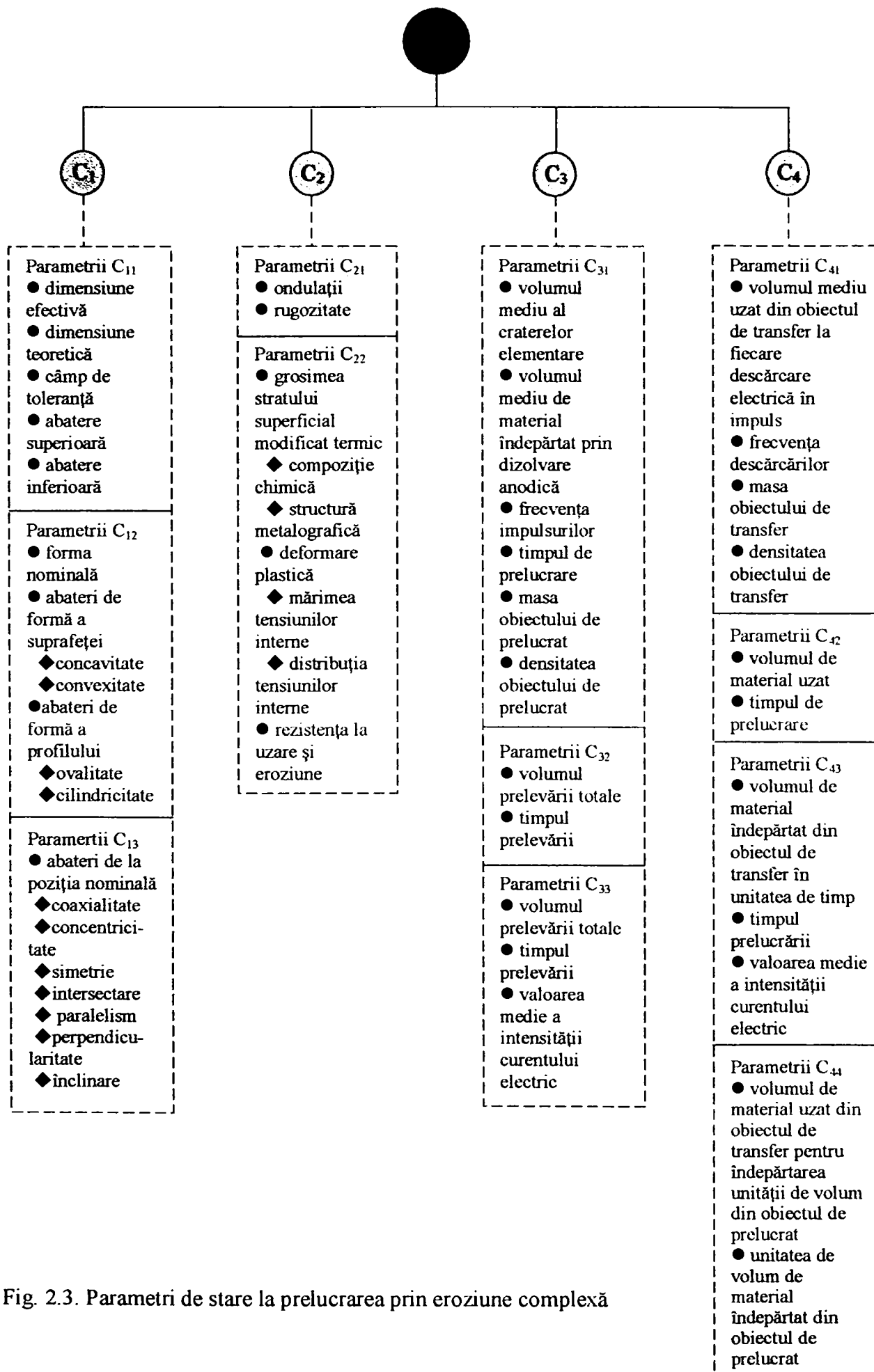


Fig. 2.3. Parametri de stare la prelucrarea prin eroziune complexă

Variația parametrilor exteriori provoacă un schimb de energie între sistemul termodinamic și mediul exterior determinând variația mărimilor de stare ale sistemului.

## 2.4. Factori de influență la prelucrarea prin eroziune complexă

Caracteristicile tehnologice la prelucrarea prin eroziune complexă sunt influențate de un număr mare de factori ce intervin în procesul de prelucrare. Ponderea acestora este diferită, dar ei acționează simultan și în strânsă interdependență.

Pomind de la definiția sa conform căreia *factorul* reprezintă un element esențial, o condiție ce determină apariția și dezvoltarea unui proces, a unui fenomen, a unei acțiuni, se analizează care dintre aceștia determină efectul eroziv global, acționează și dirijează ponderea proceselor elementare, participă direct la realizarea stabilității procesului de prelucrare cât și la stabilirea caracteristicilor tehnologice finale.

Factorii care influențează procesul de prelucrare prin eroziune complexă pot fi electrici, mecanici, factori determinați de elementele sistemului termodinamic (obiect de transfer, obiect de prelucrare, mediu de lucru), factori determinați de sistemul tehnic (instalația de prelucrare), factori determinați de tipul prelucrării, de operatorul uman, de mediul înconjurător.

S-au analizat factorii de influență la prelucrarea prin eroziune complexă, succesiv, dar grupați în funcție de natura lor.

S-a constatat că un factor de influență nu poate fi privit izolat, într-o relație unică de determinare. Fiecare factor de influență este în același timp factor determinant pe de o parte a unor caracteristici tehnologice și implicit a unor parametri de stare, iar pe de altă parte factor determinat al unui alt factor de influență și deci a unor parametri de proces. În consecință, un factor de influență, indiferent de natura lui, respectă dualitatea determinării: *factor de influență determinat* de alți factori sau parametri și *factor de influență determinant* al unor alți factori și parametri.

Această interdependență subliniază, încă odată, complexitatea întregului proces de prelucrare prin eroziune complexă.

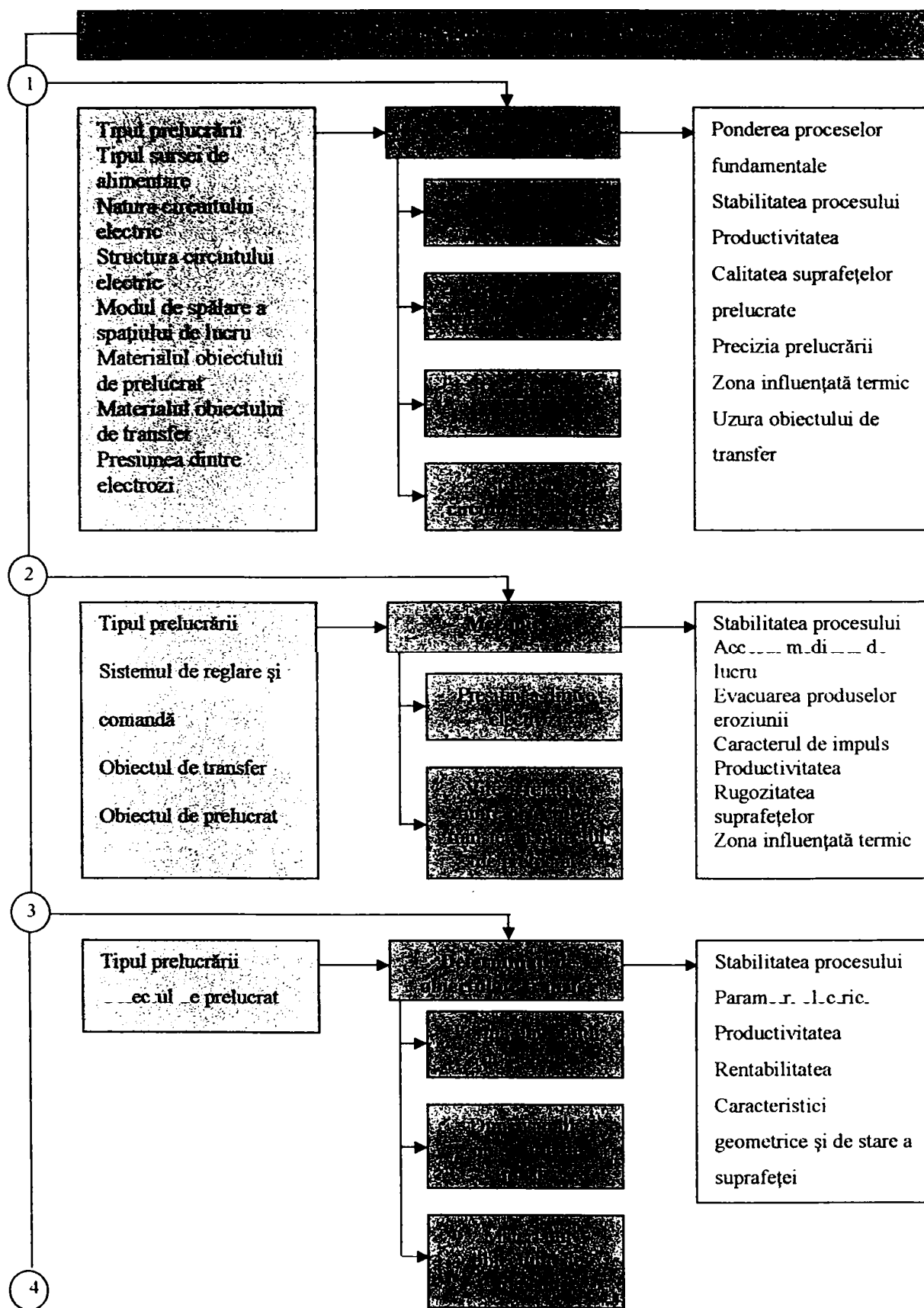
În figura 2.4 se încearcă sintetizarea, într-o formă grafică, a interdependenței factorilor de influență în cazul prelucrării dimensionale prin eroziune complexă.

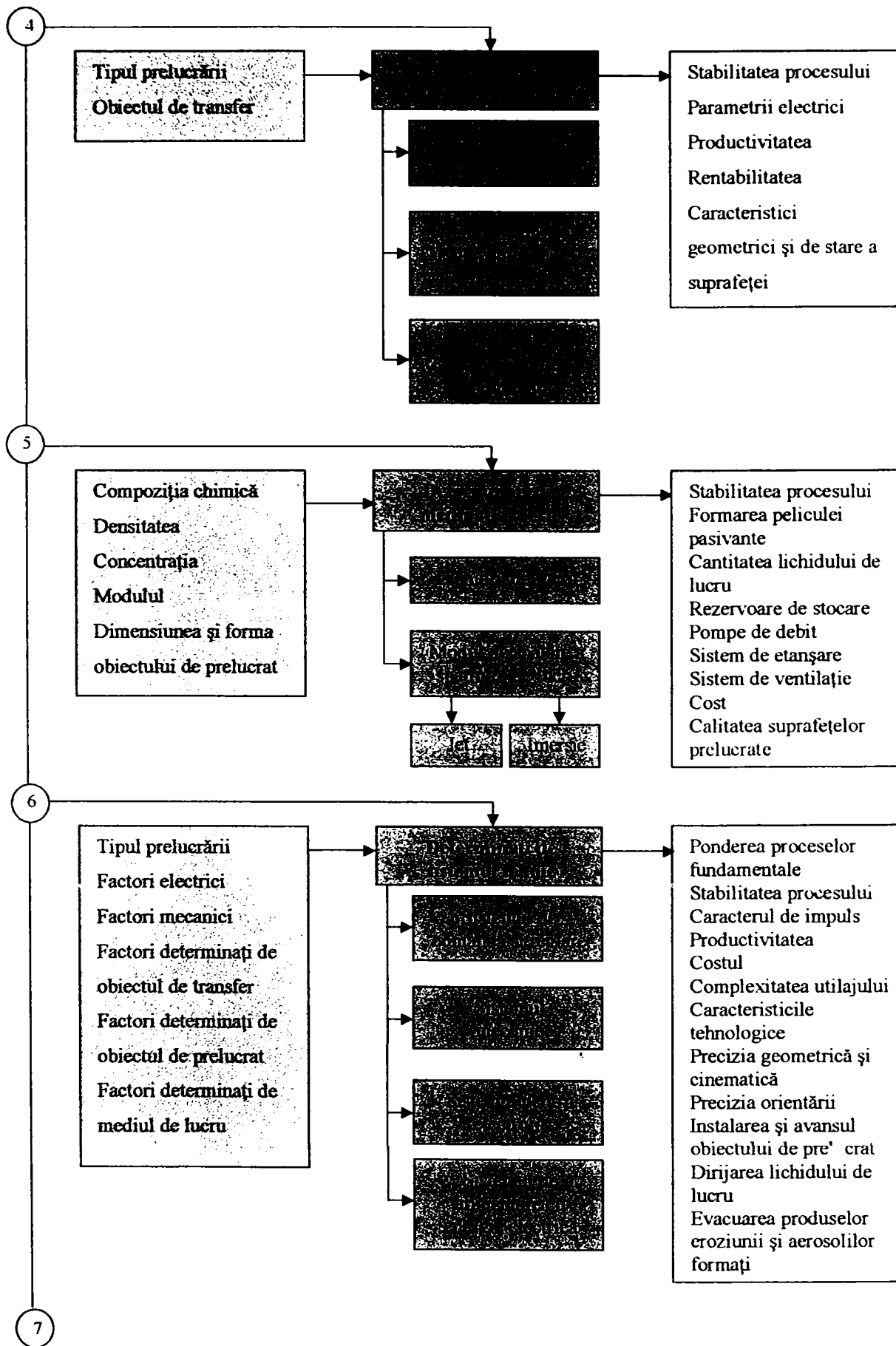
## 2.5. Criterii de clasificare a indicatorilor de performanță

### 2.5.1. Prezentare generală

Numărul mare al indicatorilor de performanță, influențele lor reciproce, sistemul complex al intercondiționărilor impun, pentru o evidență mai strictă și o analiză corespunzătoare, sistematizarea lor după diverse criterii [30, 39, 41, 42, 46, 47, 48, 49, 58, 61, 62, 89], conform figurii 2.5.

Pomind de la această reprezentare sintetică, se prezintă indicatorii de performanță aparținând fiecărui criteriu și fiecărei categorii.





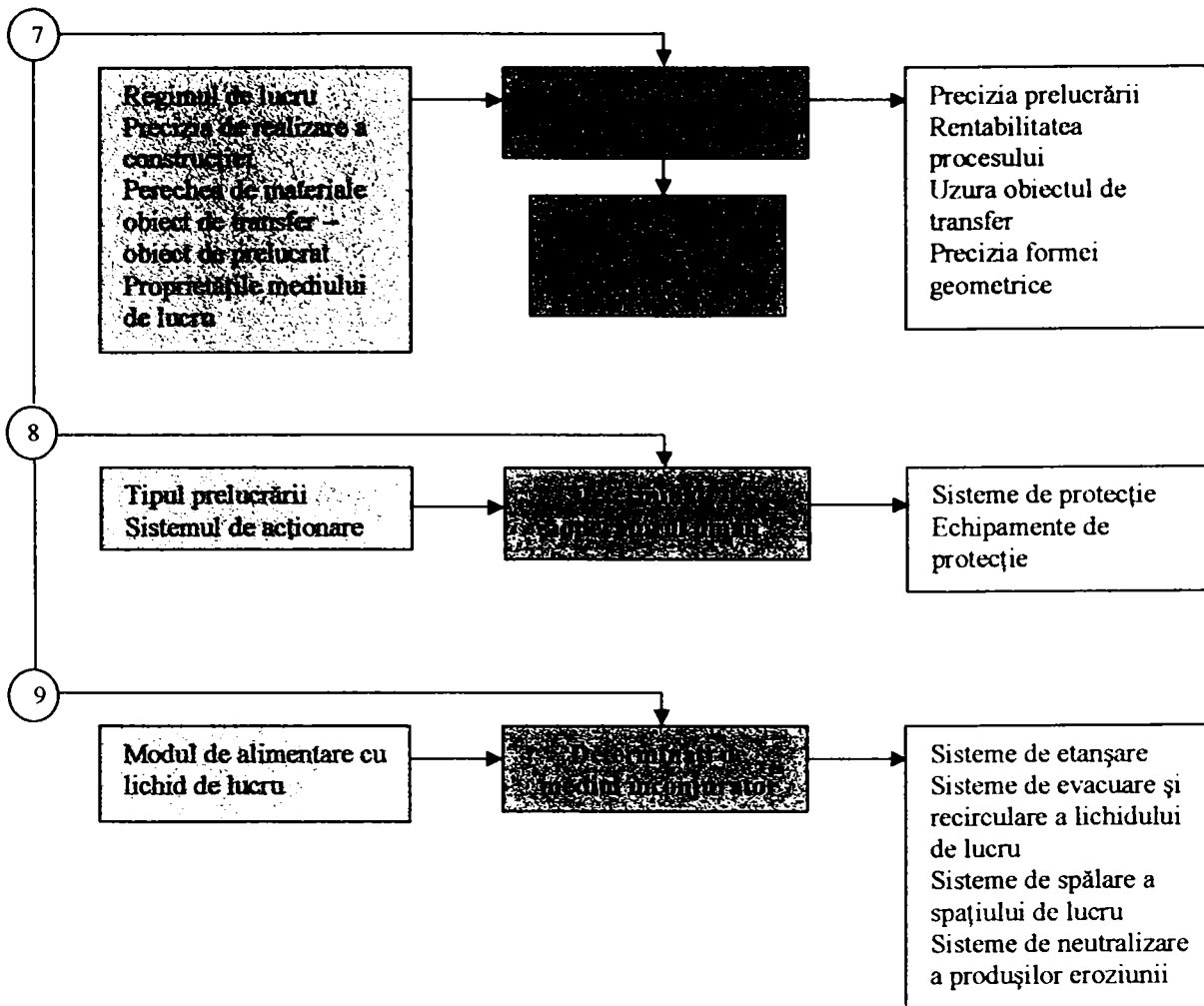


Fig. 2.4. Interdependența factorilor de influență la prelucrarea prin eroziune complexă

### 2.5.2. Mărimi primare, măsurabile direct

Mărimile primare ce pot fi măsurate direct se pot grupa în următoarele categorii:

- *legate de obiectul de transfer* (mărimi inițiale și finale):
  - forma obiectului de transfer;
  - dimensiunile obiectului de transfer (diametrul și grosimea);
  - precizia formei geometrice (planeitate, cilindricitate etc.);
  - precizia poziției reciproce (coaxialitate, cilindricitate, perpendicularitate etc.);
  - rugozitatea și ondulațiile suprafețelor obiectului de transfer;
  - masa inițială ( $m_{OT1}$ ) și finală ( $m_{OT2}$ ) a obiectului de transfer.
- *legate de obiectul de prelucrat*:
  - dimensiunile inițiale ale obiectului de prelucrat;
  - dimensiunile finale ale suprafețelor obținute prin eroziune complexă;
  - precizia formei geometrice a suprafețelor obținute prin eroziune complexă;

- precizia poziției reciproce a suprafețelor obținute prin eroziune complexă;
- materialul, compoziția chimică și structura metalografică a obiectului de prelucrat;
- masa inițială ( $m_{OP1}$ ) și finală ( $m_{OP2}$ ) a obiectului de prelucrat;
- structura și proprietățile stratului modificat termic;

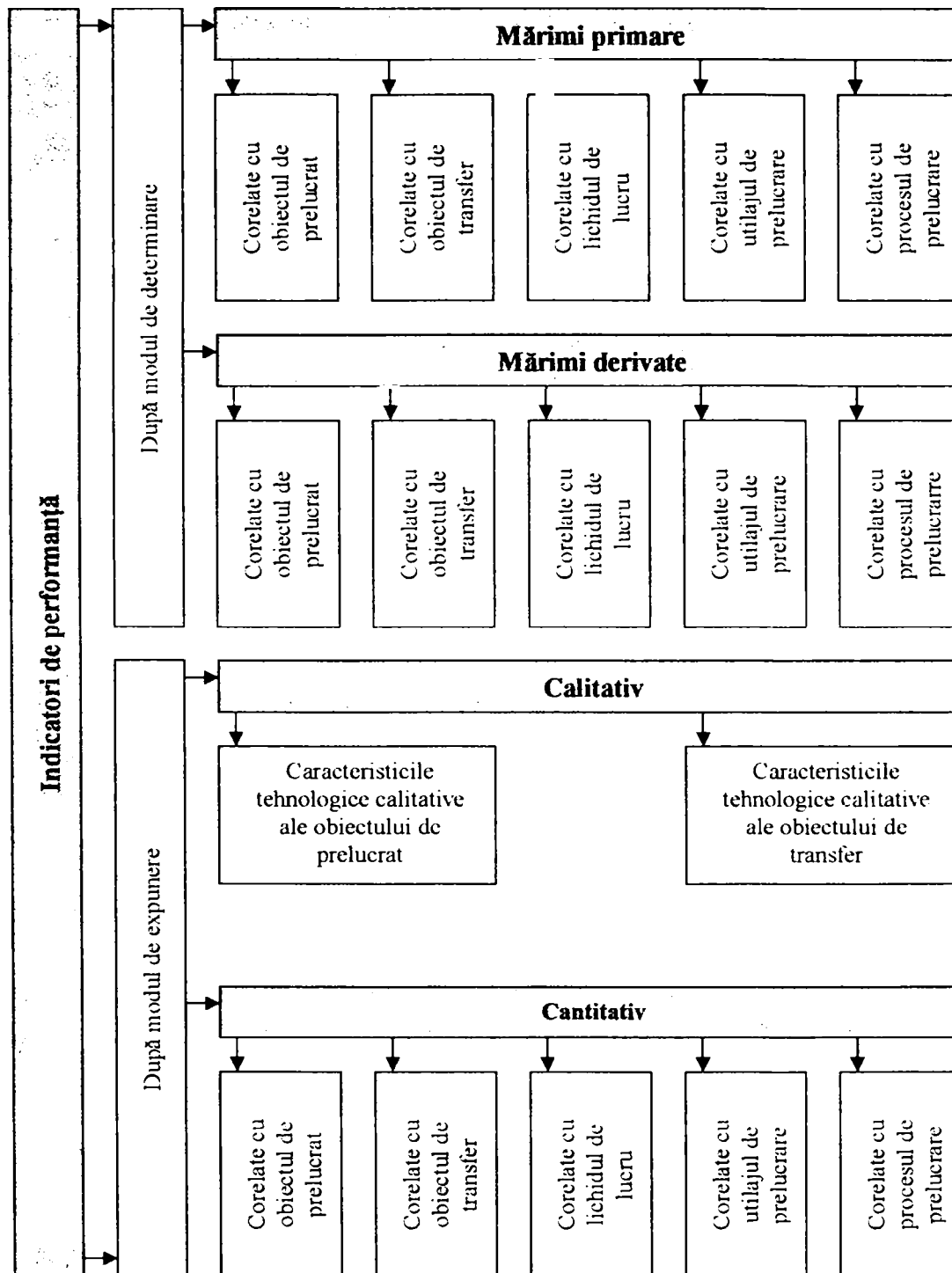


Fig.2.5. Criterii de clasificare a indicatorilor de performanță



- duritatea inițială și finală a obiectului de prelucrat;
- aspectul suprafeței prelucrate;
- prezența sau absența, numărul, forma și dimensiunile unor defecte specifice (fisuri și urme de coroziune, pete decarburate etc.).
- *legate de lichidul de lucru:*
  - natura lichidului de lucru;
  - parametri chimici ai lichidului de lucru;
  - densitatea lichidului de lucru;
  - temperatura inițială și finală a lichidului de lucru;
  - debitul și presiunea lichidului de lucru.
- *legate de utilajul de prelucrare:*
  - dimensiunile de gabarit ale zonei de prelucrare;
  - turația obiectului de transfer;
  - mărimea maximă a curselor de lucru;
  - tensiunea de mers în gol a generatorului de curent continuu;
  - mărimea parametrilor electrici ai circuitului de alimentare (rezistență R, inductivitate I, capacitate C);
  - energia electrică consumată pentru antrenarea obiectului de transfer;
  - energia electrică consumată pentru antrenarea pompei pentru lichidul de lucru;
  - energia electrică consumată în sistemul de avans automat.
- *legate de procesul de prelucrare:*
  - timpul de prelucrare;
  - forțele de apăsare dintre obiectul de transfer și obiectul de prelucrat;
  - lungimea curselor de lucru;
  - parametri electrici ai prelucrării (tensiunea de lucru, intensitatea curentului de prelucrat etc.);
  - frecvența descărcărilor electrice în impuls –  $f_{ep}$ .

### 2.5.3. Mărimi primare derivate, obținute prin calcul

Prin calcul se pot obține următoarele mărimi:

- *legate de obiectul de transfer:*
  - masa de material îndepărtată din obiectul de transfer  $m_{OT}[g]$ ;



- volumul de material îndepărtat din obiectul de transfer:

$$V_{OT} = \frac{m_{OT1} - m_{OT2}}{\rho_{OT}} [\text{mm}^3], \quad (2.1)$$

unde:  $\rho_{OT}$  [ $\text{g}/\text{mm}^3$ ] - densitate material obiect de transfer.

- debitul uzării  $Q_{OT}$ , calculat cu relația:

$$Q_{OT} = \frac{V_{OT}}{\tau} [\text{mm}^3 / \text{min}] \quad (2.2)$$

- uzura relativă volumică  $v_u$ :

$$v_u = \frac{V_{OT}}{V_{OP}} \cdot 100 [\%] \quad (2.3)$$

- debitul specific al uzării  $q_{OT}$ :

$$q_{OT} = \frac{Q_{OT}}{I_m} [\text{mm}^3 / \text{A} \cdot \text{min}] \quad (2.4)$$

- volumul mediu uzat din obiectul de transfer la fiecare descărcare electrică în impuls  $V_{ET}$ :

$$V_{ET} = \frac{V_{OT}}{\tau} [\text{mm}^3] \quad (2.5)$$

- legate de obiectul de prelucrat:

- masa de material îndepărtată din obiectul de prelucrat,  $m_{OP}$ [g]:

- volumul de material îndepărtat din obiectul de prelucrat,  $V_{OP}$ :

$$V_{OP} = \frac{m_{OP1} - m_{OP2}}{\rho_{OP}} [\text{mm}^3], \quad (2.6)$$

unde:  $\rho_{OP}$  [ $\text{g}/\text{mm}^3$ ] – densitatea materialului obiectului de prelucrat.

- volumul mediu elementar al craterului rezultat la o descărcare elementară  $V_{EP}$  și volumul de material îndepărtat din obiectul de prelucrat prin dizolvare anodică  $V_{DA}$ :

$$V_{EP} + V_{DA} = \frac{V_{OP}}{f_{ep} \cdot \tau} [\text{mm}^3] \quad (2.7)$$

- productivitatea prelucrării  $Q_{OP}$ :

$$Q_{OP} = \frac{V_{OP}}{\tau} [\text{mm}^3 / \text{min}] \quad (2.8)$$

- productivitatea specifică a prelucrării  $q_{OP}$ :

$$q_{OP} = \frac{Q_{OP}}{I_m} [\text{mm}^3 / \text{min} \cdot \text{A}] \quad (2.9)$$

- precizia de prelucrare.
- *legate de lichidul de lucru:*
  - consumul specific de lichid de lucru,  $Q_{LL}$ ;
  - durata între două schimbări complete ale lichidului de lucru,  $\tau_{LL}$ .
- *legate de utilajul de prelucrare:*
  - viteza periferică medie a obiectului de transfer,  $v_{OT}$ ;
  - viteza medie de avans,  $s_e$ ;
  - energia electrică consumată pentru acționarea obiectului de transfer, dacă nu se măsoară direct,  $N_{OT}$ ;
  - energia electrică consumată de acționarea pompei, dacă nu se măsoară direct,  $N_{LL}$ ;
  - energia electrică consumată în proces, dacă nu se măsoară direct,  $N_P$ ;
  - energia electrică consumată în sistemul de avans automat, dacă nu se măsoară direct,  $N_{SAA}$ .
- *legate de procesul de prelucrare:*
  - presiunea de contact dintre obiectul de transfer și obiectul de prelucrat,  $p$  [ $\text{daN/mm}^2$ ];
  - timpul specific de lucru,  $t_s$ :

$$t_s = \frac{t}{V_{OP}} \quad [\text{min/mm}^3] \quad (2.10)$$

- costul specific al obiectului de transfer  $C_{OT}$ :

$$C_{OT} = K_{OT} \cdot Q_{OT} \cdot C_{MOT} \quad [\text{lei/min}] \quad (2.11)$$

unde:  $K_{OT}$  – un coeficient care ține cont de dimensiunile obiectului de transfer și de dimensiunile de la care nu mai poate fi utilizat;

$C_{MOT}$  [ $\text{lei/mm}^3$ ] – costul specific al materialului obiectului de transfer.

- costul specific al lichidului de lucru utilizat,  $C_{LL}$ :

$$C_{LL} = K_{LL} \cdot Q_{LL} \cdot C_{LL} \quad [\text{lei/min}] \quad (2.12)$$

unde:  $K_{LL}$  – un coeficient care ține cont de durata dintre două schimbări complete a lichidului de lucru;

$C_{LL}$  [ $\text{lei/min}$ ] – costul specific al lichidului de lucru.

- costul specific al energiei electrice consumate:

$$C_{SEE} = K_{EE} \cdot (N_{OT} + N_{LL} + N_P) \cdot C_{EE} \quad [\text{lei/kW}] \quad (2.13)$$

unde:  $K_{EE}$  – un coeficient care ține cont de condițiile concrete de prelucrare;

$C_{EE}$ [lei/kW] – costul specific al energiei electrice.

- costul specific total al prelucrării:

$$C_S = C_{SOT} + C_{SLL} + C_{SEE} + C_{SM} + C_{SG} + C_{SS} \quad (2.14)$$

unde:  $C_{SG}$ [lei/min] – costul specific al unității economice;

$C_{SS}$ [lei/min] – costul specific al secției de prelucrare.

#### 2.5.4. Mărimi calitative și cantitative, în funcție de modul de exprimare

Indicatorii de performanță analizați pot fi clasificați și în funcție de modul de exprimare. Astfel, toți aceia care furnizează informațiile în baza unor aprecieri nemăsurabile constituie mărimile calitative, iar cei ce furnizează datele în urma unor măsurători constituie mărimile cantitative. O apreciere corectă nu se poate face decât dacă se ține cont de ambele categorii de mărimi.

### 2.6. Concluzii privind aplicarea conceptului sistemic la evaluarea procesului de prelucrare prin eroziune complexă

Din analiza caracteristicilor tehnologice (cap. 2.2), a parametrilor de stare (cap. 2.3), a factorilor de influență (cap. 2.4), elemente ce constituie cerințe, respectiv restricții în procesul de prelucrare prin eroziune complexă, precum și din analiza indicatorilor de performanță (cap. 2.5) constatăm intercorelările extrem de complexe ale acestor elemente.

Literatura de specialitate [50, 51, 53, 54, 56, 57, 63, 64, 66, 75, 85, 86, 87, 92, 98, 111, 116] ne oferă multe date referitoare la rezultatul studiului acestor elemente, acestea constituind, pe lângă cercetările proprii, suportul nemijlocit al abordării sistemice în prezentul capitol.

Printre aspectele neelucidate integral și care necesită o abordare atât teoretică cât și experimentală, deosebit de importantă este influența câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă.

În acest sens se analizează, din punct de vedere teoretic și în concepție sistemică, unele aspecte termoenergetice ale procesului de prelucrare prin eroziune complexă, urmând ca studiul propriu-zis al influenței câmpului termic, atât teoretic cât și experimental să se realizeze, în acest studiu, pe un anumit segment al sistemului termodinamic.

### 3. CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND CONCEPTUL DE SISTEM TERMODINAMIC ȘI DE BILANȚ ENERGETIC LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ

#### 3.1. Concepte fundamentale referitoare la noțiunea de energie

##### 3.1.1. Terminologie și clasificare

*Energia* este o mărime derivată a lumii fizice și se caracterizează prin proprietatea esențială de a fi conservată în sisteme închise. Conservarea acesteia se face cantitativ, ca urmare a transformărilor calitative. Energia nu apare din nimic și nici nu dispare, ci se transformă. O definiție generală este aceea care o prezintă ca *măsură a mișcării materiei* însă una dintre cele mai frecvente forme de manifestare a energiei este lucrul mecanic.

Echivalentul în lucru mecanic al tuturor acțiunilor exterioare care se produc la trecerea unui sistem de la o stare la alta, constituie energia sistemului în starea inițială, în raport cu starea finală. Această definiție poate fi prezentată și sub forma: energia unui sistem este capacitatea acestuia de a efectua lucru mecanic, la trecerea sa de la o stare la cealaltă.

Definițiile conturează conceptul de energie, nu însă și numeroasele caracteristici și particularități ale acesteia. Trebuie subliniat faptul că lucrul mecanic și căldura nu sunt energii, ci forme de manifestare a schimburilor de energie și apar doar în cazurile când sistemele termodinamice schimbă energie între ele sau cu exteriorul [70, 77, 78, 106, 110, 114, 132, 133].

În figura 3.1 este reprezentată schematizat clasificarea diverselor forme de energie.

##### 3.1.2. Condiții de transformare a energiei

Analizate din punct de vedere al primului principiu al termodinamicii, diferitele forme de energie, ordonate sau neordonate, sunt echivalente cantitativ. Potrivit celui de-al doilea principiu al termodinamicii, gradul de transformabilitate al diferitelor forme de energie depinde de categoria din care face parte forma de energie considerată [106, 110, 114, 133].

Astfel, valoarea de utilizare a unei energii depinde de cantitatea acesteia și de gradul său de transformabilitate într-o formă ordonată de energie. Ca *măsură a transformabilității* poate fi utilizată *energia mecanică* sau *energia electrică*, energii ce pot fi transformate integral în orice altă formă de energie.

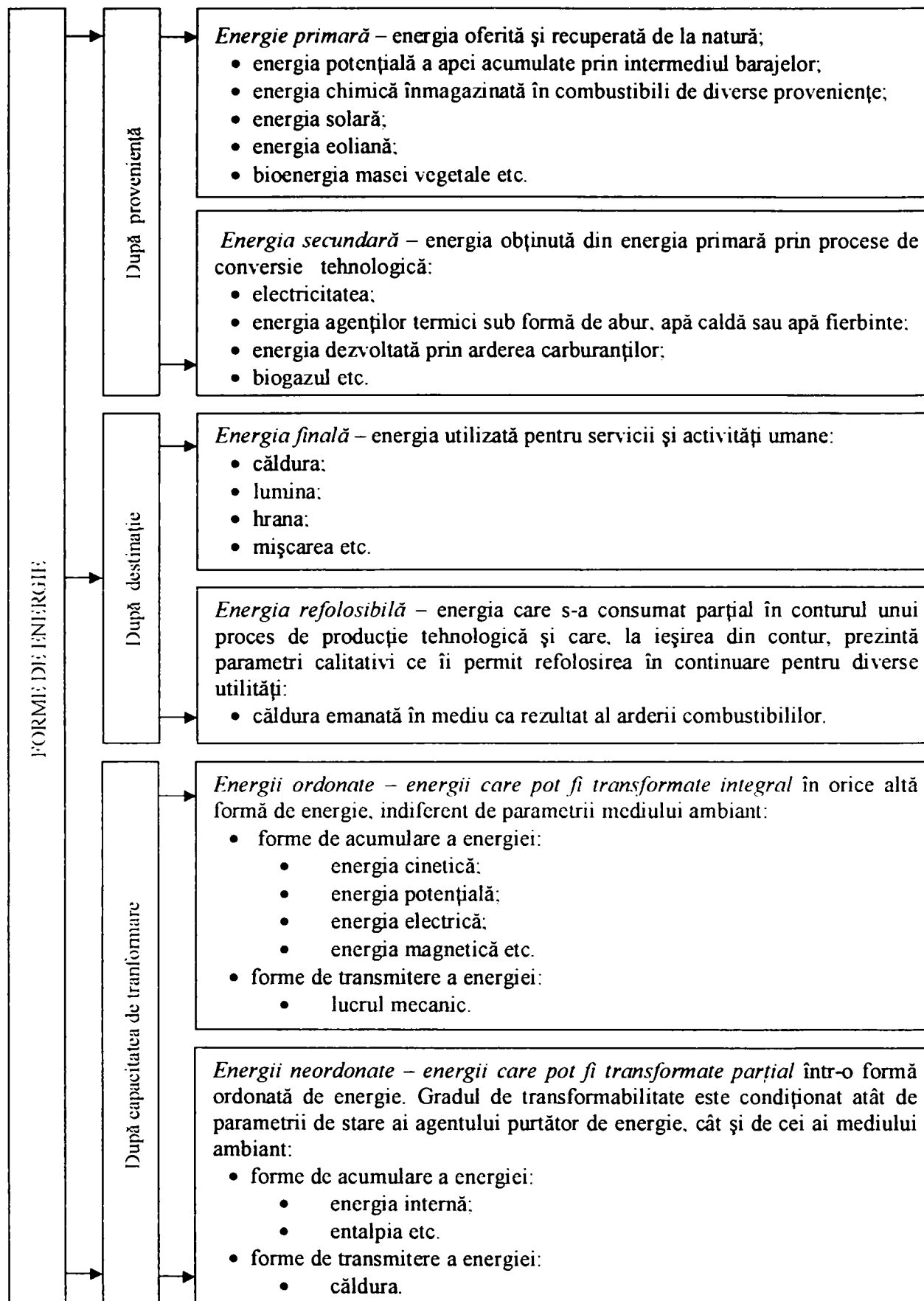


Fig. 3.1. Reprezentarea schematizată a formelor de energie

### 3.1.3. Exergia și anergia

În general, lucrul mecanic efectuat în procesele termodinamice este determinat de starea sistemului respectiv, de forma energiei consumate, de gradul de perfecțiune a proceselor, precum și de starea mediului ambiant [93, 106, 133].

Pentru constituirea unei metode care să permită considerarea simultană, în egală măsură, a tuturor factorilor determinați, se introduc noțiunile de *exergie* și *anergie*. Ele depind de starea sistemului, de forma energiei consumate, de ireversibilitatea proceselor de transformare a energiei și de starea mediului ambiant. Operând cu aceste mărimi se respectă caracterul conservativ al energiei, cât și cel restrictiv, privitor la sensul și limita posibilă a transformărilor de energie.

*Exergia* este cantitatea maximă de energie care, pentru o stare dată a mediului ambiant, în condiții de reversibilitate totală a proceselor, se poate transforma în oricare altă formă de energie. Conținutul noțiunii de exergie este identic cu cel al noțiunii de energie cu capacitate nelimitată de transformare. În această categorie se încadrează în mod deosebit energiile electrică și mecanică.

*Anergia* este energia care nu se poate transforma în exergie, nici măcar parțial, chiar în condiții de reversibilitate totală. Conținutul noțiunii de anergie este identic cu cel al noțiunii de energie cu capacitate nulă de transformare. Din această categorie face parte căldura disponibilă la temperatura mediului ambiant, precum și energia internă corespunzătoare stării de echilibru cu mediul ambiant.

În conformitate cu principiul al doilea al termodinamicii, energiile cu capacitate limitată de transformare nu se pot transforma decât parțial în lucru mecanic, deci în exergie, iar restul acestor energii constituie anergie.

Energia este așadar concepută ca fiind formată din exergie și anergie, astfel încât o cantitate dată de energie este egală cu suma dintre exergia și anergia corespunzătoare:

$$Energia = Exergie + Anergia \quad (3.1)$$

Putem deci spune că exergia și anergia au caracterul unor noțiuni complementare, prin intermediul lor putându-se exprima orice formă de energie, oricare ar fi capacitatea de transformare a acesteia, deoarece partea de energie transformabilă fără restricții este egală cu exergia, iar partea de energie netransformabilă în exergie este chiar anergia.

La unele forme de energie, una dintre cele două componente poate fi nulă. De exemplu, energia electrică este constituită integral din exergie, anergia fiind nulă, iar exergia mediului ambiant este nulă, energia acestuia constând doar în anergie.

În cazul sistemelor termodinamice închise, conform primului principiu al termodinamicii, energia totală a sistemelor  $W$  este constantă.

Dacă se utilizează simbolul  $E$  pentru exergie și  $A$  pentru anergie, suma dintre exergie și anergie este constantă:

$$E + A = W = ct. , \quad (3.2)$$

relație ce constituie expresia energetică a primului principiu al termodinamicii, evidențiind caracterul conservativ al sumei dintre exergie și anergie. Astfel, se poate afirma că nu există o lege a conservării exergiei și a anergiei cum este a conservării energiei, deci cele două mărimi sunt neconservabile.

Exergia poate fi utilizată ca o mărime de evaluare în procesele energetice, atât în ceea ce privește energiile vehiculate, cât și calitatea proceselor. În analizele tehnice ale proceselor energetice, utilizarea exergiei permite o mai corectă și mai precisă conturare a soluțiilor analizate, o mai corectă separare și clasificare a acestora, precum și o corespondență mai riguroasă între rezultatele obținute și realitate.

În cazul căldurii, exergia corespunde numai acelei părți din mișcarea termică pe seama căreia se obține lucru mecanic. Dar lucrul mecanic care se poate obține dintr-o anumită căldură depinde de potențialul termodinamic al acesteia, de perfecțiunea proceselor prin care se realizează transformarea de energie, precum și de limita inferioară a potențialului termodinamic realizabil.

Astfel, exergia corespunzătoare unei călduri este partea maximă din căldura respectivă care se poate transforma în lucru mecanic, pentru o stare dată a mediului ambiant:

$$e_q = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) q_1 = \eta_c \cdot \dot{q}_1 \quad (3.3)$$

respectiv:

$$E_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) Q_1 = \eta_c \cdot Q_1 \quad (3.4)$$

unde:  $e_q$ ,  $E_Q$  – exergia căldurii;

$T_0$  – temperatura mediului ambiant;

$T_1$  – temperatura finală;

$\dot{q}_1$ ,  $Q_1$  – căldura disponibilă;

$\eta_c$  – randamentul transformării.

Anergia corespunzătoare unei călduri este partea din căldura respectivă care, pentru o stare dată a mediului ambiant, nu se poate transforma în lucru mecanic, chiar în condiții de ireversibilitate totală a proceselor.

Astfel:

$$a_q = \frac{T_0}{T_1} q_1 = (1 - \eta_c) \dot{q}_1 \quad (3.5)$$

sau

$$A_Q = \frac{T_0}{T_1} \cdot Q_1 = (1 - \eta_c) \cdot Q_1 \quad (3.6)$$

unde:  $a_q$ ,  $A_Q$  - anergia căldurii,

iar anergia corespunzătoare căldurii  $Q_{1-2}$  este:

$$A_Q = T_0 \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (3.7)$$

Energia aceleiași cantități de căldură este:

$$E_Q = Q_{12} - A_Q = \int_1^2 \delta Q - T_0 \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (3.8)$$

### 3.1.4. Pierderi de exergie

Partea de energie transformată în anergie în cadrul proceselor ireversibile se consideră *pierdere de exergie* [93, 133]. Aceasta crește cu mărirea gradului de ireversibilitate a proceselor.

Pierderea de exergie se poate determina din ecuația bilanțului de exergie:

$$e_1 + e_{q_{12}} = e_2 + l_{t_{12}} + \Pi_{12} \quad (3.9)$$

sau din cea a bilanțului de anergie:

$$a_1 + a_{q_{12}} + \Psi_{12} = a_2 \quad (3.10)$$

unde:  $\Pi_{12}$  – pierderea de exergie în același proces;

$\Psi_{12}$  – creșterea de anergie determinată de condițiile de desfășurare a procesului.

Din relația (3.9) avem:

$$\Psi_{12} = (a_2 - a_1) - a_{q_{12}} \quad (3.11)$$

$$\Psi_{12} = T_0(s_2 - s_1) - T_0 \int_1^2 \frac{\delta q}{T} \quad (3.12)$$

$$\delta a = T_0 \delta s - T_0 \frac{\delta q}{T} \quad (3.13)$$

Pierderea de exergie este egală cu creșterea de anergie determinată de ireversibilitatea procesului:

$$\Pi_{12} = \Psi_{12} \quad (3.14)$$

sau:

$$\delta \Pi = \delta a \quad (3.15)$$



## 3.2. Bilanțul energetic

### 3.2.1. Definiții. Scop. Clasificare

*Bilanțul energetic* este studiul prin care se analizează procesele de transformare a energiei ce au loc în conturul unui proces de producție materială [6, 7, 114, 115, 125]. Rolul său este de a determina consumurile de energie din conturul procesului analizat și de a le evidenția în componente utile și pierderi. În acest fel, bilanțul energetic constituie suportul tehnic de analiză a pierderilor de energie din conturul procesului de producție materială, în scopul preconizării măsurilor pentru eliminarea sau reducerea acestora. Ca mijloc tehnico-științific de investigare a procesului de producție materială, bilanțul energetic constituie o metodă particulară de analiză a valorii procesului în care *conceptul de valoare* este înlocuit prin *conceptul de energie*.

Modelul matematic al *bilanțului energetic cantitativ* – *bilanț energetic* exprimă principiul conservării energiei, iar modelul matematic al *bilanțului energetic calitativ* – *bilanț exergetic* exprimă, pe lângă principiul conservării energiei și pe acela al degradării acesteia în transformările ireversibile. În acest sens se definește mulțimea mărimilor de intrare, se calculează pierderile din conturul de bilanț, se stabilesc valorile randamentelor și se constituie setul mărimilor de ieșire.

Conturul unui bilanț este suprafața închisă care cuprinde limitele față de care se consideră intrările și ieșirile de energie și care închide în interiorul său întregul obiect sau sistem de producție la care se referă bilanțul și numai acest obiect sau sistem. Astfel, conturul unui bilanț coincide cu interiorul fizic al obiectului sau sistemului analizat.

Întocmirea bilanțurilor energetice este necesară pentru realizarea următoarelor obiective:

- ridicarea calitativă a nivelului de exploatare tehnică și economică a instalațiilor și agregatelor consumatoare de resurse energetice;
- proiectarea obiectivelor noi sau reconstituirea celor existente;
- omologarea și recepția instalațiilor și utilajelor de producere, transformare și utilizare a energiei de toate formele.

Elementele bilanțurilor energetice se pot determina pe bază de:

- măsurări special efectuate;
- elemente statistice rezultate din măsurări de exploatare curentă, din perioadele anterioare elaborării bilanțului;
- calcule teoretice;
- date din literatura de specialitate;
- oferte și documentații tehnice;
- combinații ale căilor prezentate.

În figura 3.2 este reprezentată schematizat clasificarea bilanțurilor energetice.

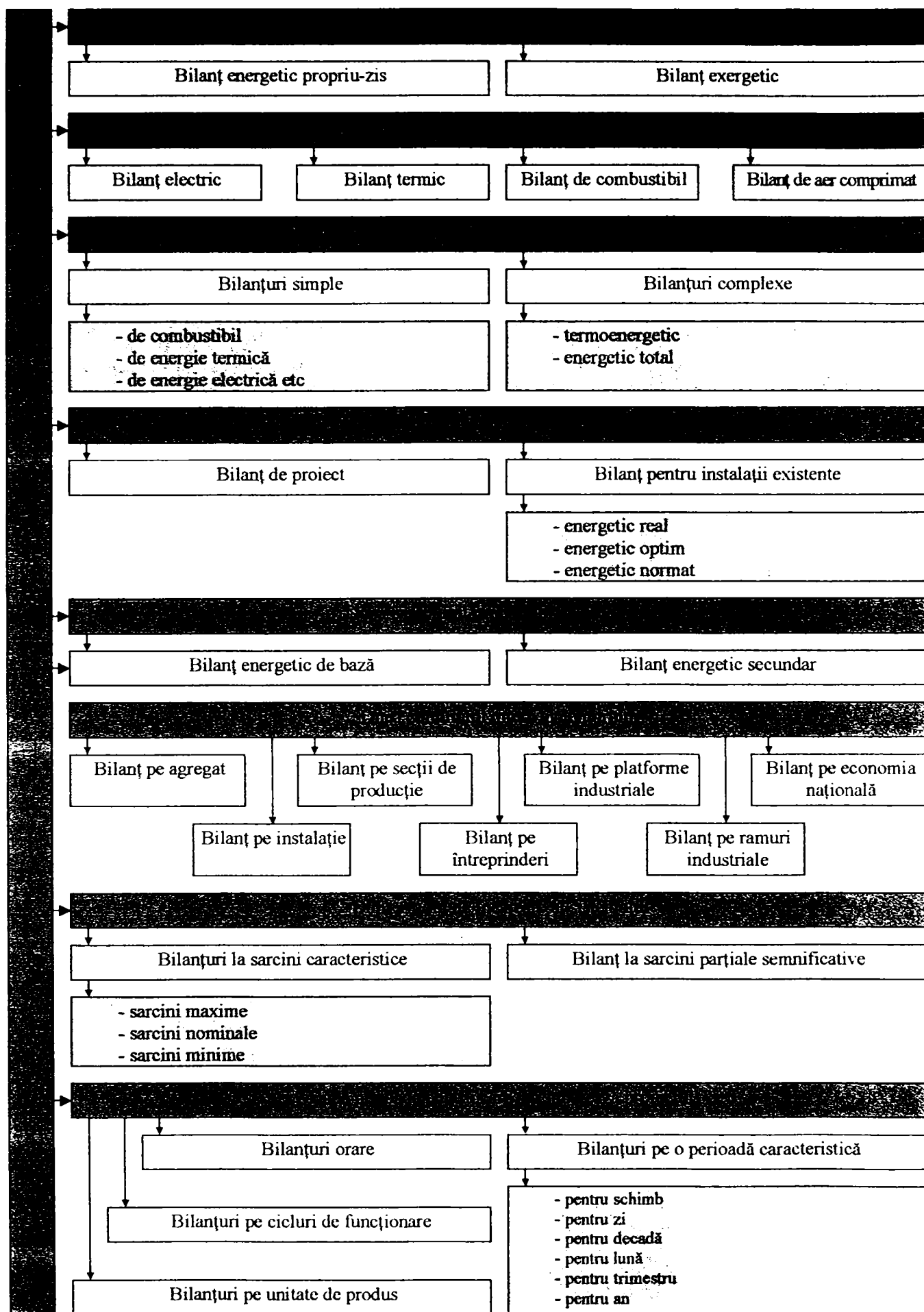


Fig 3.2. Schema de sinteză a clasificării bilanțurilor energetice

### 3.2.2. Modul de elaborare a unor bilanțuri

#### 3.2.2.1. Bilanțul termoenergetic

Bilanțul termoenergetic [6, 7] exprimă corelația dintre căldura intrată într-un contur de bilanț, pierderile care au loc și energia utilă, necesară proceselor tehnologice ce se desfășoară în sistemul analizat. Bilanțul termoenergetic se exprimă cu relația:

$$Q_i = Q_u + Q_p + Q_{res} \quad [\text{J/u.r.}] \quad (3.16)$$

unde:  $Q_i$ [J/u.r.] – căldura introdusă în conturul de bilanț analizat, raportată, după tipul bilanțului, la o oră, la un ciclu de fabricație sau la unitatea de produs realizată;

$Q_u$ [J/u.r.] – căldura utilă;

$Q_p$  [J/u.r.] – pierderile de căldură la nivelul conturului de bilanț;

$Q_{res}$  [J/u.r.] – căldura livrată altor contururi ca resursă energetică secundară recuperată.

#### 3.2.2.2. Bilanțul exergetic

Bilanțul exergetic [6, 7] furnizează precizări foarte importante în ce privește valoarea pierderilor reale de energie, localizarea și stabilirea adevăratelor cauze ale pierderilor, permite analizarea concretă a măsurilor tehnico-organizatorice menite să contribuie la diminuarea pierderilor și inclusiv la ridicarea performanțelor proceselor respective.

Ecuția generală a unui bilanț exergetic corespunde atât principiului conservării energiei, ca și în bilanțul energetic propriu-zis, cât și principiului degradării energiei în transformările ireversibile.

Aplicarea metodei de analiză exergetică presupune determinarea tuturor componentelor unui bilanț energetic, precum și a parametrilor de stare ai purtătorilor de energie ce participă într-un contur de bilanț.

În cele ce urmează se prezintă relațiile de calcul pentru principalele componente ale bilanțului exergetic.

a) *Exergia corespunzătoare unei energii mecanice:*

$$E_{mec} = W_{mec} \quad [\text{J/u.r.}] \quad (3.17)$$

b) *Exergia corespunzătoare unei energii electrice:*

$$E_{ee} = W_{ee} \quad [\text{J/u.r.}] \quad (3.18)$$

c) *Exergia introdusă sau evacuată dintr-un contur de bilanț de către cantitatea  $G$ , în kg sau  $\text{Nm}^3$ , dintr-un material:*

$$E_m = G \cdot e_m = (I_1 - I_0) - T_0(S_1 - S_0) \quad [\text{J}] \quad (3.19)$$

unde:  $e_m$  [J/kg sau J/Nm<sup>3</sup>] – exergia unității de masă sau de volum din materialul respectiv, iar

$$e_m = (i_1 - i_0) - T_0 (s_1 - s_0) \text{ [J/kg sau J/Nm}^3\text{]} \quad (3.20)$$

$$I_1 = G i_1 \text{ [J]} \quad (3.21)$$

$$I_0 = G i_0 \text{ [J]} \quad (3.22)$$

$$S_1 = G s_1 \text{ [J/K]} \quad (3.23)$$

$$S_0 = G s_0 \text{ [J/K]} \quad (3.24)$$

unde:  $i_1$  [J/kg · K sau J/Nm<sup>3</sup>] – entalpia materialului în starea 1;

$i_0$  [J/kg · K sau J/Nm<sup>3</sup>K] – entalpia materialului în starea de referință;

$s_1$  [J/kg · K sau J/Nm<sup>3</sup>K] – entropia materialului în starea 1;

$s_0$  [J/kg · K sau J/Nm<sup>3</sup>K] – entropia materialului în starea de referință;

$T_0$  [K] – temperatura absolută a stării de referință.

d) *Exergia unei cantități de căldură cedată sau preluată de o masă materială*

$$E_Q = Q \left[ 1 - \frac{T_0}{T_1} \right] \text{ [J]} \quad (3.25)$$

unde:  $T_1$  [K] – temperatura purtătorului căldurii  $Q$ .

e) *Pierderea de exergie în cadrul unui proces de transfer a cantității de căldură  $Q$ , între temperaturile  $T_1$  și  $T_2$ :*

$$\Pi_{1-2} = T_0 \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) Q = T_0 \frac{\Delta T}{T_1 \cdot T_2} Q = T_0 \Delta S \text{ [J]} \quad (3.26)$$

### 3.2.3. Prezentarea de principiu a procesului de eroziune complexă pe baza schemelor fluxurilor tehnologice și energetice

Procesele fundamentale care au loc la prelucrarea dimensională prin eroziune complexă, prezentate explicit în cap. 1, sunt reprezentate într-o schemă de principiu în figura 3.3, dar pentru o mai bună evaluare a schimbului energetic ce însoțește procesul de prelucrare prin eroziune complexă aceasta se dezvoltă în figura 3.4, realizând astfel evidențierea fenomenelor ce au loc în timpul desfășurării procesului eroziv în ansamblul său.

Figura 3.4, prin modul de reprezentare, pune în evidență modul de desfășurare a proceselor: *simultanitate temporală și diferențiere spațială*.

La definirea componentelor bilanțului energetic se va analiza fiecare fenomen care are loc la prelucrarea prin eroziune complexă, indiferent de ponderea sa, prin delimitarea sistemelor termodinamice cărora le aparțin.

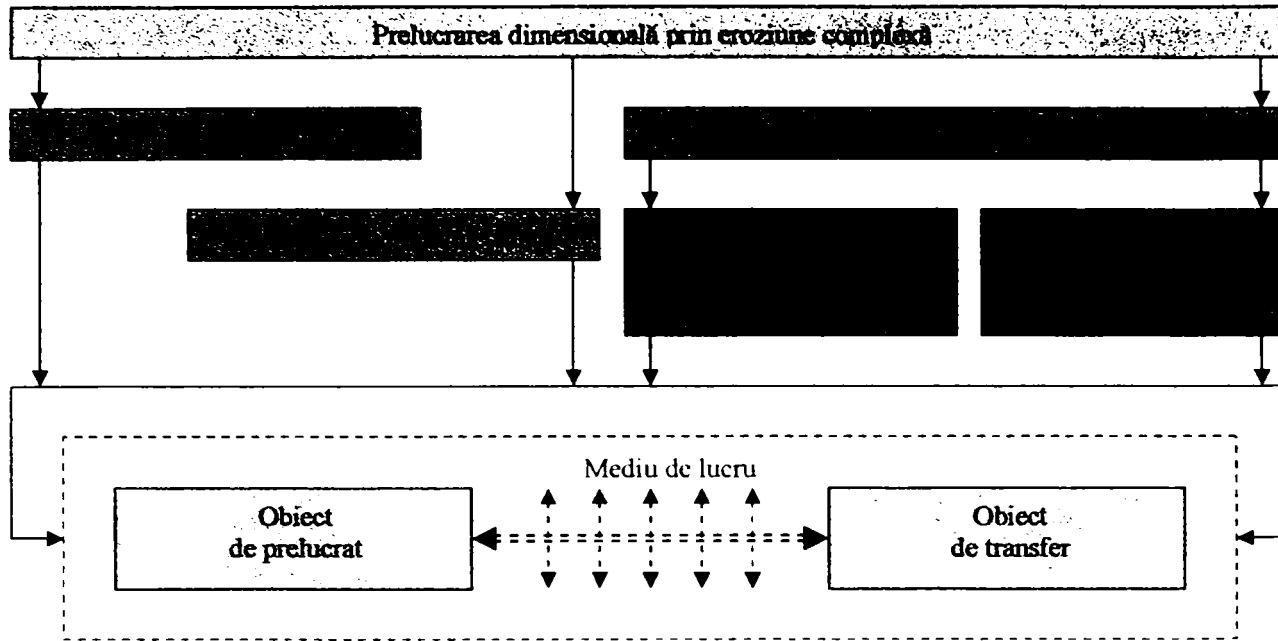


Fig.3.3. Schema de principiu a procesului de eroziune complexă

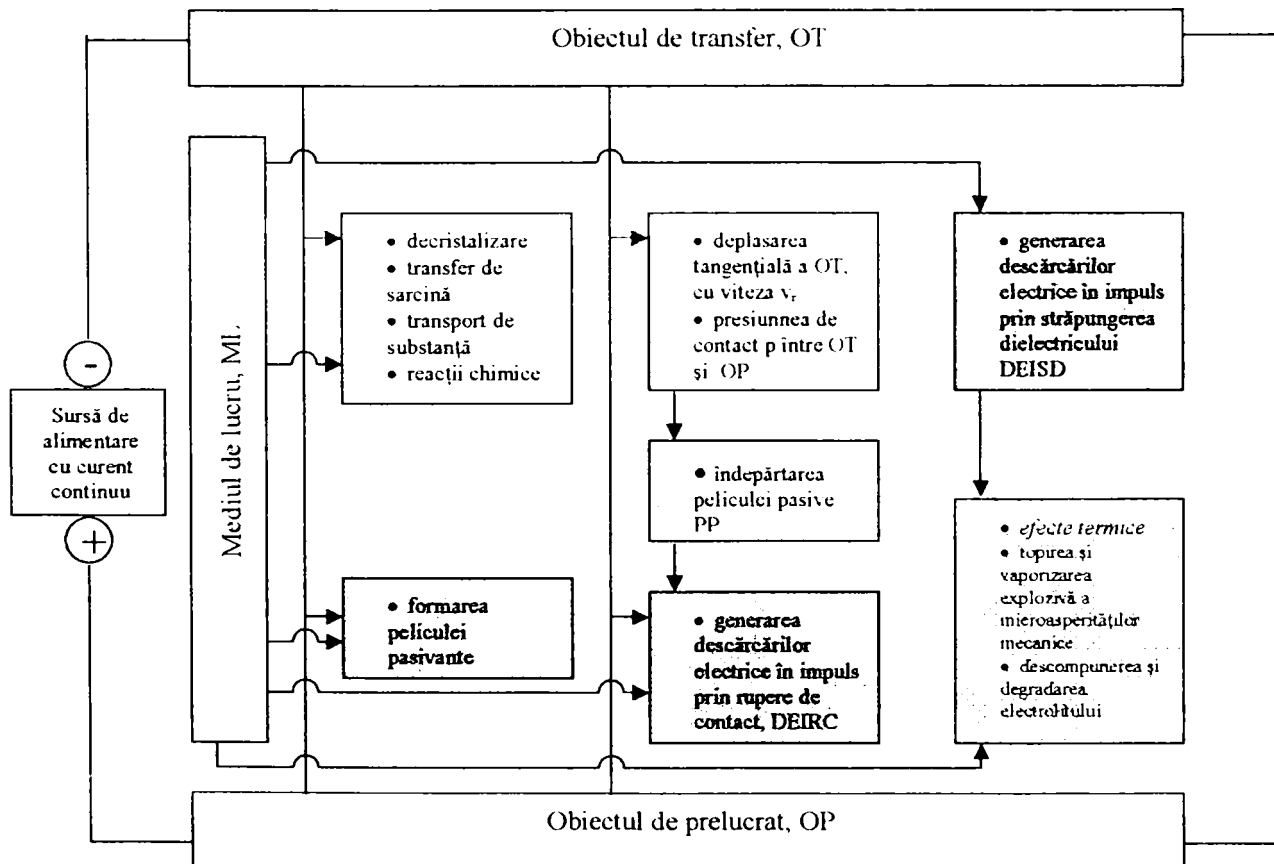


Fig.3.4. Fenomenele evidențiate la prelucrarea prin eroziune complexă

### 3.3. Sistemul termodinamic

*Sistemul termodinamic*, în general, este un sistem fizic macroscopic [70, 74, 78, 110, 114, 119, 132, 133], alcătuit dintr-un număr foarte mare și finit de particule, cărora i se aplică legile termodinamicii, iar în interiorul lui mișcarea se manifestă sub formă de mișcare termică.

Sistemul termodinamic este separat de mediul exterior prin *pereți* (suprafețe separatoare) care pot sau nu să fie materializați. Interacțiunea a două sisteme este condiționată de natura pereților sau a suprafețelor care le separă. Ansamblul acestora reprezintă incinta sistemului iar proprietățile sale de permeabilitate determină natura peretelui (adiabatic - restrictiv la materie, nerrestrictiv la energie sub formă de lucru mecanic; diaterm - restrictiv la materie, nerrestrictiv la energie; permeabil - nerrestrictiv la materie și energie; semipermeabil – restrictiv la materie și energie pentru anumite specii chimice; impermeabil - restrictiv la materie).

Un sistem închis într-o incintă adiabatică este un sistem izolat termic. În acest caz incinta este impermeabilă la orice parametru extensiv. Putem spune că un sistem închis este un sistem care se află într-o incintă impermeabilă la materie, iar un sistem care nu este închis se numește sistem termodinamic deschis.

În cazul propus spre analiză, sistemul termodinamic este un sistem deschis, lărgit, în care se face atât schimb de energie, cât și de masă. Apare așadar un schimb de energie în urma interacțiunilor mecanice (lucru mecanic) și un schimb de energie în urma interacțiunii termice dintre sistem și mediul exterior sau între elementele sistemului. Mărimea care caracterizează acest schimb de energie este *căldura*. Schimbul de căldură fiind însoțit de schimbări de fază și schimb de substanță, fenomenul transmiterii căldurii devine extrem de complicat și, prin urmare, și studiul acestuia. În procesul de transmitere a căldurii are loc o degradare a energiei prin transformarea unei părți a exergiei în anergie.

Starea energetică a unui sistem termodinamic este determinată prin natura, masa și energia corpurilor componente, prin condițiile sale interioare și exterioare. Modificarea condițiilor interioare nu atrage după sine, în mod obligatoriu, o schimbare a condițiilor sale exterioare. Variația condițiilor exterioare este însă însoțită întotdeauna de modificarea condițiilor interioare.

Un sistem se găsește în *stare de echilibru termodinamic* atunci când, aflându-se în condiții exterioare variabile, condițiile lui interioare nu suferă modificări, ci se mențin constante în timp. Prin urmare, proprietățile macroscopice ale sistemului nu prezintă variații. Stările de echilibru sunt stări simple ale sistemelor termodinamice iar între parametrii de stare există relații bine determinate și aceștia nu depind de timp.

Dacă un sistem uniform care se află în stare de echilibru este divizat în două sau mai multe subsisteme (microsisteme), prin introducerea unor suprafețe separatoare (pereți) se constată că fiecare subsistem rămâne în stare de echilibru.

Trecerea unui sistem termodinamic dintr-o stare de echilibru în alta, prin parcurgerea unei succesiuni de stări caracterizate prin valori precise ale mărimilor de stare, reprezintă *transformarea de stare*. Astfel, transformarea de stare este formată din mulțimea ordonată de stări succesive prin care trece, în timp, un sistem.

Sistemul care parcurge o transformare termodinamică de stare este numit *agent termic* sau *agent de lucru*. Când transformarea termodinamică poate fi parcursă în ambele sensuri, astfel încât sistemul să treacă prin aceleași stări de echilibru, *transformarea termodinamică este reversibilă*. *Transformarea termodinamică este ireversibilă* când nu poate avea loc în ambele sensuri. Fenomenele din mecanica reală sunt întotdeauna ireversibile, deoarece sunt însoțite de frecare. Căldura produsă prin frecare este cedată de sistem mediului ambiant (exterior), iar sensul de trecere este inversat.

### **3.4. Aspecte teoretice ale transmiterii căldurii la prelucrarea prin eroziune complexă**

#### **3.4.1. Noțiuni generale**

Teoria propagării căldurii [8, 70, 77, 84, 93, 114, 115, 128, 133] se ocupă cu cercetarea fenomenelor și măsurarea schimburilor de căldură care au loc în sistemele materiale ale căror părți componente se află la temperaturi diferite.

În procesele de transmitere a căldurii se urmărește, fie determinarea energiei termice maxime ce poate fi transmisă prin unitatea de suprafață, fie obținerea randamentului optim de utilizare a unor surse de căldură, fie reducerea la minimum a trecerii unui flux termic printr-o anumită suprafață.

Propagarea căldurii se poate realiza prin:

- *conducție termică*;
- *convecție termică*;
- *radiație termică*.

În fenomenele reale de transmitere a căldurii pot interveni cele trei moduri de propagare în proporții diferite. Ele sunt variabile în timp, fiind prin excelență fenomene ireversibile. Fiecare mod de transmitere a căldurii are legea sa proprie. Studiul simultan prezintă dificultăți și de aceea, pentru fiecare sistem (subsistem) termodinamic se ia în considerare modul de propagare ce se manifestă



mai pregnant. Procesul transmiterii energiei termice este strâns legat de distribuția temperaturii în sistemul considerat.

Temperatura, în cazul cel mai general, este o funcție de coordonatele spațiale și de timpul  $\tau$  iar *totalitatea valorilor instantanee ale temperaturilor, în spațiul dat, se numește câmp de temperatură*. Acesta poate fi definit în coordonate carteziane (rel.3.27), coordonate cilindrice (rel. 3.28), coordonate sferice (rel. 3.29) și vectorial (rel. 3.30).

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (3.27)$$

$$t = f(r, \varphi, z, \tau) \quad (3.28)$$

$$t = f(r, \varphi, \psi, \tau) \quad (3.29)$$

$$t = f(\vec{r}, \tau) \quad (3.30)$$

Ecuatiile scrise mai sus, în care temperatura variază în timpul  $\tau$ [s], descriu câmpuri de temperaturi nestaționare.

Locul geometric al punctelor din spațiu cu aceeași temperatură reprezintă o suprafață izotermă. Aceste suprafețe nu se intersectează fiind suprafețe închise sau limitate de marginile corpului.

### 3.4.2. Conducția termică

#### 3.4.2.1. Definierea conducției termice

*Conducția termică* reprezintă transportul direct al căldurii în interiorul aceluiași corp material (lipsit de mișcări aparente), în masa căruia există diferențe de temperatură, sau între corpuri diferite, atunci când între acestea există un contact intim și diferențe de temperatură. Transmiterea căldurii prin conducție este caracteristică corpurilor solide. La lichide și gaze conducția termică intervine numai în stratul limită sau în straturi de grosime foarte mică.

*Fourier* a stabilit experimental *legea fundamentală a transmiterii căldurii prin conducție termică*, care indică proporționalitatea directă a densității fluxului termic cu căderea de temperatură și se exprimă prin relația:

$$q = \lambda(-\text{grad}t) = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{dt}{dn} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3.31)$$

Propagarea căldurii are loc în direcția variației maxime de temperatură și în sensul temperaturilor descrescătoare. Prin urmare, sensul vectorului  $q$  este invers celui al gradientului de temperatură.

Factorul de proporționalitate  $\lambda$  poartă numele de *conductivitate termică* sau *coeficient de conductibilitate termică*. Acesta reprezintă căldura ce se transmite în unitatea de timp printr-o



suprafață unitară, pentru o cădere de temperatură de un grad (pe unitatea de lungime).

$$\lambda = -q \frac{1}{|\text{grad}t|} = \frac{Q}{\Delta\tau \Delta l/l} \left[ \frac{W}{mK} \right] \quad (3.32)$$

Coeficientul  $\lambda$  exprimă proprietatea intrinsecă a corpurilor referitoare la conducția termică și are valori diferite pentru corpuri diferite, iar pentru un același corp depinde de structura sa, densitate, umiditate și temperatură. Variația coeficientului  $\lambda$  cu temperatura este determinată de creșterea volumului corpului, amplificarea mișcării particulelor elementare și de modificările structurii rețelei cristaline a corpului.

Experimental s-a obținut dependența conductivității termice de temperatură sub forma:

$$\lambda = \lambda_0 (1 \pm bt) \left[ \frac{W}{mK} \right] \quad (3.33)$$

unde:  $\lambda_0$  – valoarea conductivității termice la  $0^\circ\text{C}$ , iar *semnul minus* se referă la majoritatea metalelor pentru care conductivitatea termică scade o dată cu creșterea temperaturii.

### 3.4.2.2. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin conducție

Sintetizând cele de mai sus și ținând cont de elementele care intervin în ecuațiile ce definesc transmiterea căldurii prin conducție termică se realizează reprezentarea schematică din figura 3.5.

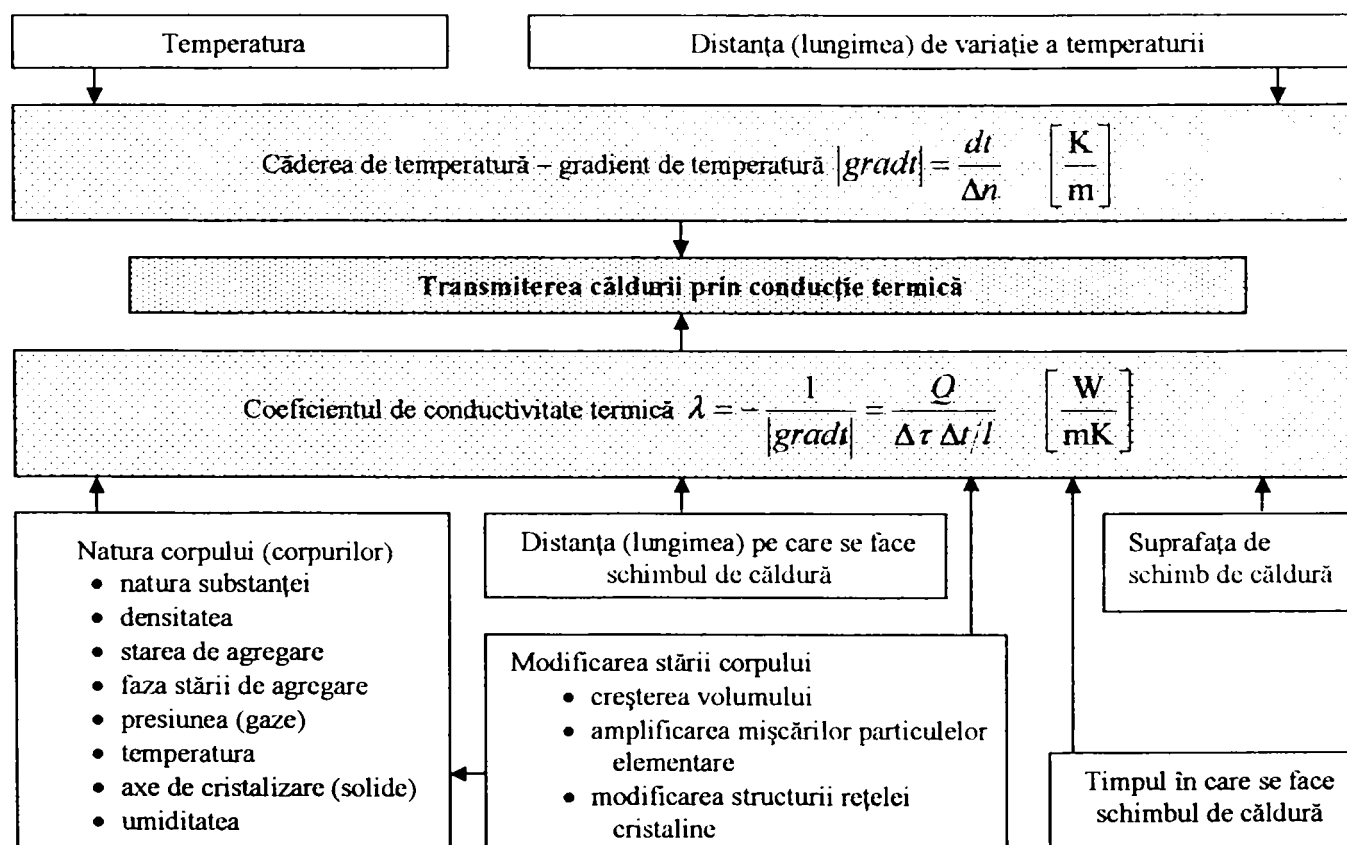


Fig. 3.5. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin conducție termică

### 3.4.3. Convecția termică

#### 3.4.3.1. Definirea convecției termice

*Convecția termică* reprezintă modul de transmitere macroscopică a căldurii și are loc datorită unui fluid în mișcare, când elementul conducător (fluidul) transportă energia termică din locuri cu temperatură mai mare în locuri cu temperatură mai scăzută.

Ea reprezintă astfel *procesul de schimb termic dintre un fluid și un corp solid, de temperaturi diferite, când acestea sunt puse în contact.*

Convecția termică este influențată de mișcarea fluidului și, datorită acesteia, de o serie de parametri: natura fluidului și proprietățile sale, regimul de mișcare (laminar sau turbulent) și cauza apariției mișcării fluidelor, starea de agregare a fluidului, natura, forma și dimensiunile suprafețelor de separație etc.

La baza calculului propagării căldurii prin convecție stă legea lui Newton:

$$\phi = \alpha A (t_f - t_p) \text{ [W]} \quad (3.34)$$

unde:  $t_f$  [K] – temperatura fluidului ce scaldă peretele;

$t_p$  [K] – temperatura peretelui;

$A$  [m<sup>2</sup>] – suprafața de separație;

$\alpha$  [W/m<sup>2</sup> K] – *coeficient de convecție termică* (coeficient de schimb superficial sau de trecere a căldurii prin contact).

Putem astfel defini coeficientul de convecție termică  $\alpha$  ca fiind fluxul de căldură ce se transmite prin unitatea de suprafață pentru o diferență de temperatură de un grad între perete și fluid.

Conform legii lui Fourier, fluxul termic transmis prin conducție, în stratul limită, se exprimă cu relația:

$$d\phi = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dA \quad (3.35)$$

Același flux termic, transmis prin convecție în restul fluidului, fiind:

$$d\phi = \alpha (t_f - t_p) dA = \alpha \Delta t dA \quad (3.36)$$

și egalând cele două expresii obținem:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dA = \alpha \Delta t dA \quad (3.37)$$

de unde determinăm coeficientul de convecție termică  $\alpha$ :

$$\alpha = -\frac{\lambda \partial t}{\Delta t \partial n} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (3.38)$$

Complexitatea fenomenului de convecție termică, datorită numărului mare de factori ce îl influențează, face imposibilă determinarea și urmărirea desfășurării sale pe cale analitică. Este astfel necesară încadrarea fenomenului în una din categoriile de grupare a proceselor termice convective, urmată de precizarea ecuației de calcul a coeficientului de convecție  $\alpha$ , proprie acelu grupaj.

Soluționarea analitică a ecuațiilor diferențiale în studiul transferului termic întâmpină greutăți datorită posibilității lor limitate, în condiții de unicitate impuse.

În asemenea cazuri se recurge la experimentarea pe model, rezultatele obținute fiind apoi recalulate pentru dimensiunile fenomenului original. Generalizarea rezultatelor experimentale pe model este posibilă la fenomenele care îndeplinesc anumite condiții de similitudine.

*Teoria similitudinii*, stabilind criteriul de constatare a asemănării fenomenelor de convecție termică, permite obținerea unor relații pentru determinarea coeficientului de convecție termică  $\alpha$ , aplicabile tuturor cazurilor asemănătoare, și efectuarea experimentelor pe modele, făcând ca pe de o parte, experimentul să devină posibil, iar pe de altă parte, economic.

### 3.4.3.2. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin convecție

În figura 3.6 sunt sintetizate modurile de transmitere a căldurii prin convecție termică și elementele care influențează acest schimb.

### 3.4.4. Radiația termică

#### 3.4.4.1. Definierea radiației termice

*Radiația termică* este radiația existentă în interiorul unui sistem aflat în echilibru termodinamic și reprezintă partea din radiația electromagnetică a corpurilor care depinde numai de temperatura lor.

Transferul de energie termică prin radiație nu se produce din aproape în aproape, ca și în cazul conductivității și a convecției, ci se poate produce la orice distanță. El nu este dependent decât de temperatura sursei emițătoare și de puterea absorbantă a mediului prin care se produce radiația, dar nu și de temperatura acestuia. *Lungimea de undă  $\lambda$*  a unei radiații reprezintă cea mai mică distanță dintre două puncte succesive, în direcția de propagare, după care funcția de undă ia aceleași valori și în aceeași ordine.

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \text{ [m]} \quad (3.39)$$

unde:  $c_0$  [m/s] – viteza de propagare a undei în vid;

$\nu$  [ $s^{-1}$ ] – frecvența emisiunii.

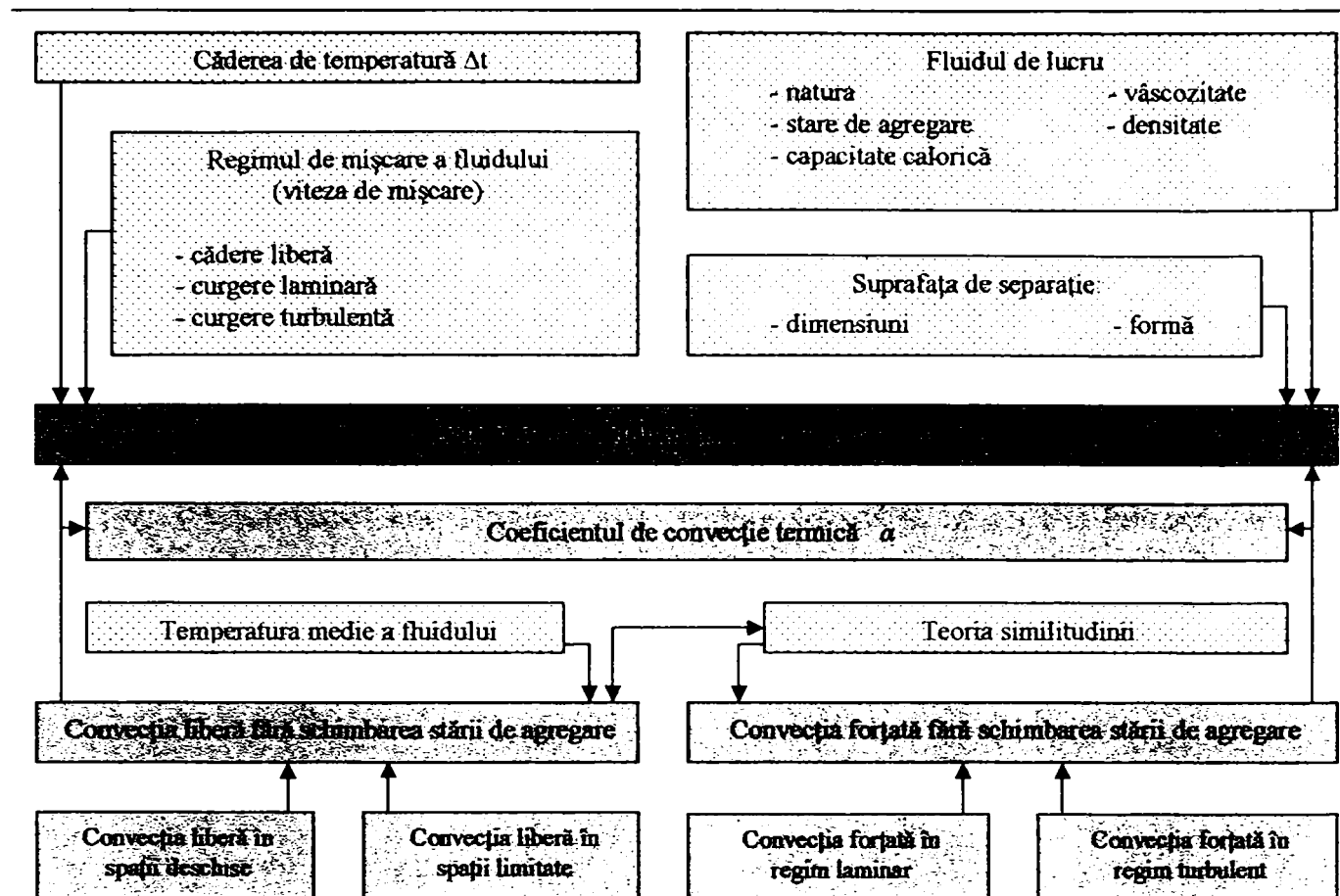


Fig. 3.6. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin convecție termică

Radiația electromagnetică poate fi descompusă spectral, fiind astfel considerată o suprapunere de radiații ale căror câmpuri electrice și magnetice variază sinusoidal în timp.

Intensitatea specifică  $I$  este:

$$I = \int_0^{\infty} I_{\nu} d\nu = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad [\text{W/m}^3] \quad (3.40)$$

unde:  $I_{\nu}$ ,  $I_{\lambda}$  – intensitate specifică spectrală

$$I_{\nu} = \frac{dI}{d\nu} \quad [\text{W/m}^3] \quad (3.41)$$

$$I_{\lambda} = \frac{dI}{d\lambda} \quad [\text{W/m}^3] \quad (3.42)$$

Radiația termică dintr-o anumită regiune a spațiului este caracterizată local prin *densitatea energiei*  $w$ :

$$w = \frac{1}{c_0} \int I d\Omega \quad [\text{Ks}] \quad (3.43)$$

unde:  $d\Omega$  – unghiul spațial elementar.

Dacă radiația nu depinde de direcția de propagare, densitatea energiei se exprimă cu relația:

$$w = \frac{4\pi}{c_0} I \text{ [Ks]} \quad (3.44)$$

Se pot defini *densitatea de radiație*  $\rho$ :

$$\rho = \frac{I}{c_0} = \frac{w}{4\pi} \text{ [Ks]} \quad (3.45)$$

și *presiunea de radiație*  $p$ , dependentă de densitatea de radiație:

$$p = \frac{\rho}{3} \text{ [Ks]} \quad (3.46)$$

Existența corpurilor complet izolate în spațiu nu este posibilă, radiațiile emise de orice corp având o influență mai mare sau mai mică asupra tuturor celorlalte corpuri întâlnite în cale. Pentru a determina schimbul de energie termică prin radiații se aplică legile lui Stefan-Boltzmann și Wien, conform cărora corpul cu temperatură mai mare emite radiații mai intense, dar concentrate la frecvențe mai mici. Acesta va fi constituit din diferența quantumurilor de radiații termice absorbite de fiecare corp, din emisiunea celuilalt și din propria emisiune reflectată de celălalt corp.

### 3.4.4.2. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin radiație

Ținând cont de elementele care intervin în relațiile de schimb de căldură ce însoțesc radiația termică, se reprezintă schematizat în figura 3.7 factorii de influență și parametrii de stare ai radiației termice.

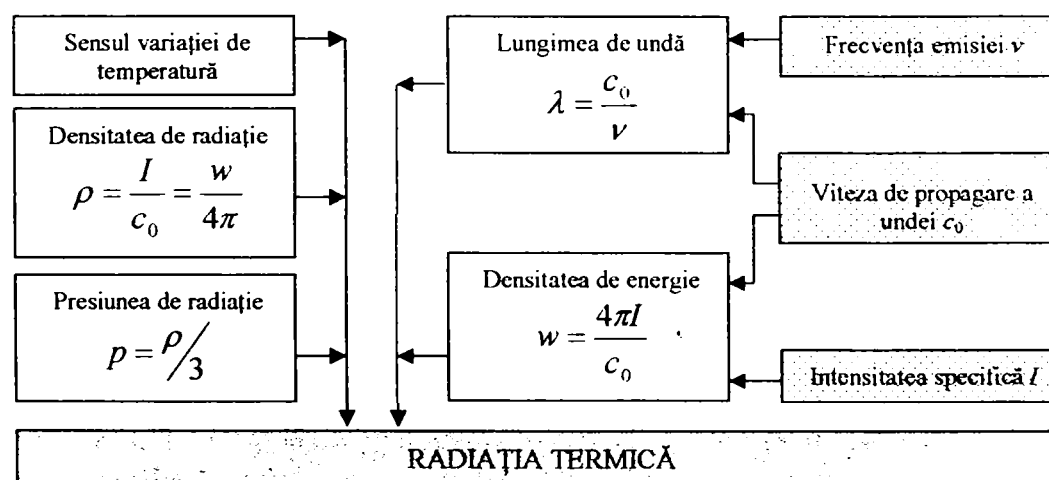


Fig. 3.7. Factori de influență și parametri de stare la transmiterea căldurii prin radiație

Pornind de la figurile 3.5, 3.6 și 3.7, se încearcă în figura 3.8 reprezentarea schematizată a parametrilor de stare și a factorilor de influență ce determină desfășurarea proceselor termice de schimb de căldură la prelucrarea prin eroziune complexă.

### **3.5. Considerații asupra schimburilor energetice la prelucrarea prin eroziune complexă**

#### **3.5.1. Principiul prelucrării prin eroziune complexă în contextul schimburilor energetice**

În baza considerațiilor generale privind prelucrarea prin eroziune complexă, prezentate teoretic în cap.1, s-a realizat schema de principiu a acestui proces de prelucrare, cu evidențierea schimbului de căldură și lucru mecanic ce are loc (figura 3.9).

#### **3.5.2. Schimbul de căldură și bilanțul termoenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă**

##### **3.5.2.1. Generalități**

În procesul de prelucrare prin eroziune complexă se îmbină fenomene electrice, mecanice, chimice și termice, manifestate atât static cât și dinamic.

Relațiile de schimb a formelor de energie între sistem și mediul exterior se bazează pe principiul conservării energiei. Pentru sistemele termodinamice, principiul transformării și conservării energiei este cunoscut sub denumirea de principiul I al termodinamicii și exprimă echivalența dintre căldura și lucrul mecanic schimbate în diverse transformări [106].

Pentru evaluarea conținutului de energie a unui sistem fizic limitat de un contur, se atribuie, prin convenție, semnul (+) pentru energia intrată în contur sub formă de căldură sau lucru mecanic și semnul (-) pentru energia ieșită din contur sub formă de căldură sau lucru mecanic.

Ansamblul tuturor utilajelor, pieselor, materialelor etc. ce contribuie la realizarea procesului de eroziune complexă, constituie un macrosistem fizic, în cazul nostru un *macrosistem termodinamic*, numit *sistem termodinamic general (STG)* iar studiul schimbului energetic va urmări doar fenomenele ce au loc în cadrul sistemului termodinamic general.

Fenomenele fundamentale ce au loc la prelucrarea prin eroziune complexă determină [31, 37, 38, 43, 44, 45, 59, 60] stabilirea unui *sistem termodinamic primar (STP)*, alcătuit din obiectul de prelucrat (OP), obiectul de transfer (OT) și mediul de lucru (ML), precum și a unui *sistem termodinamic secundar (STS)*, în componența căruia intră toate sistemele funcționale ale utilajului. Aceste sisteme funcționale sunt alcătuite din sistemul pentru electrolit (SE), sistemul mecanic (SM) și sistemul de alimentare cu energie electrică (SA), legătura dintre ele fiind asigurată de sistemul de reglare și comandă (SRC).

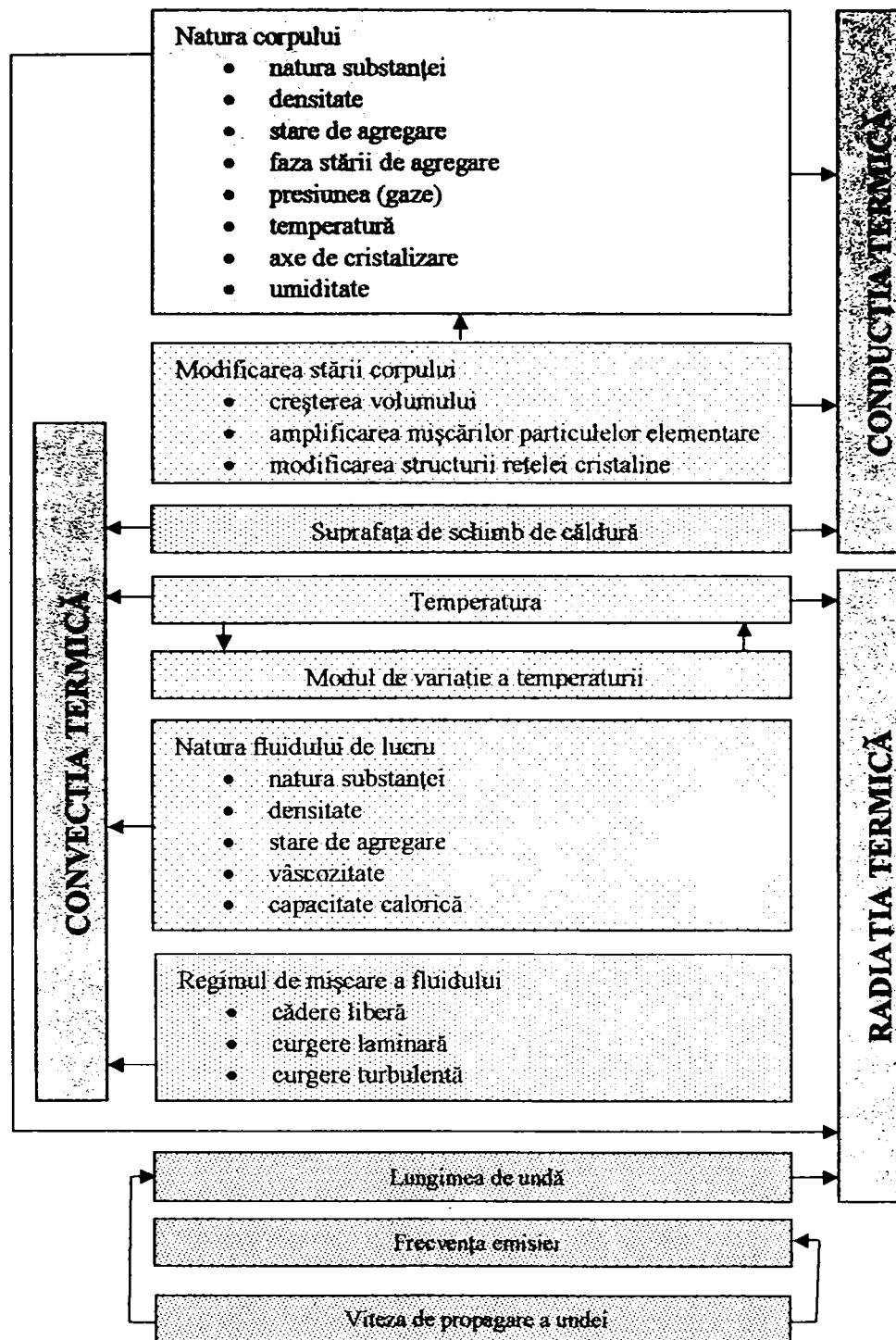


Fig. 3.8. Parametri de stare și factori de influență în procesele termice de schimb de căldură

Între sistemul termodinamic primar și sistemul termodinamic secundar există atât legătura constructivă, cât și funcțională, separarea acestora realizându-se exclusiv din punct de vedere termodinamic, pentru a putea studia schimbul energetic. Astfel, figura 3.10. reprezintă schema de principiu a sistemului termodinamic general.



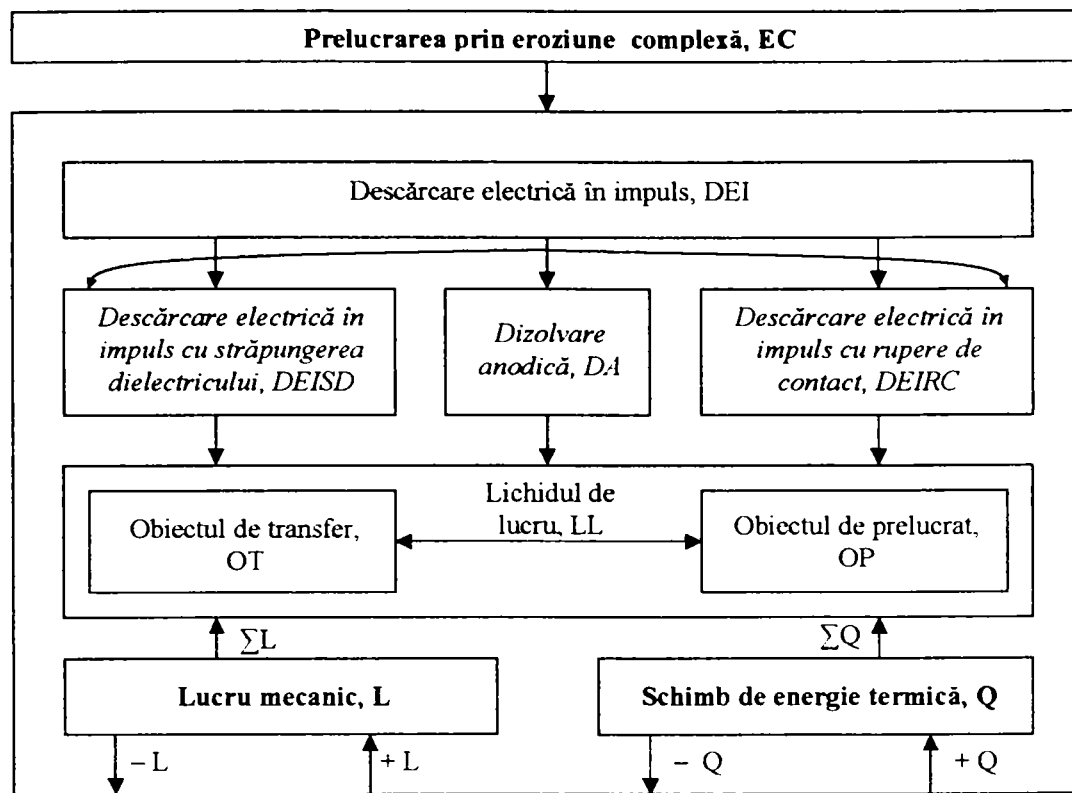


Fig.3.9. Schema de principiu a prelucrării prin eroziune complexă cu evidențierea schimburilor energetice

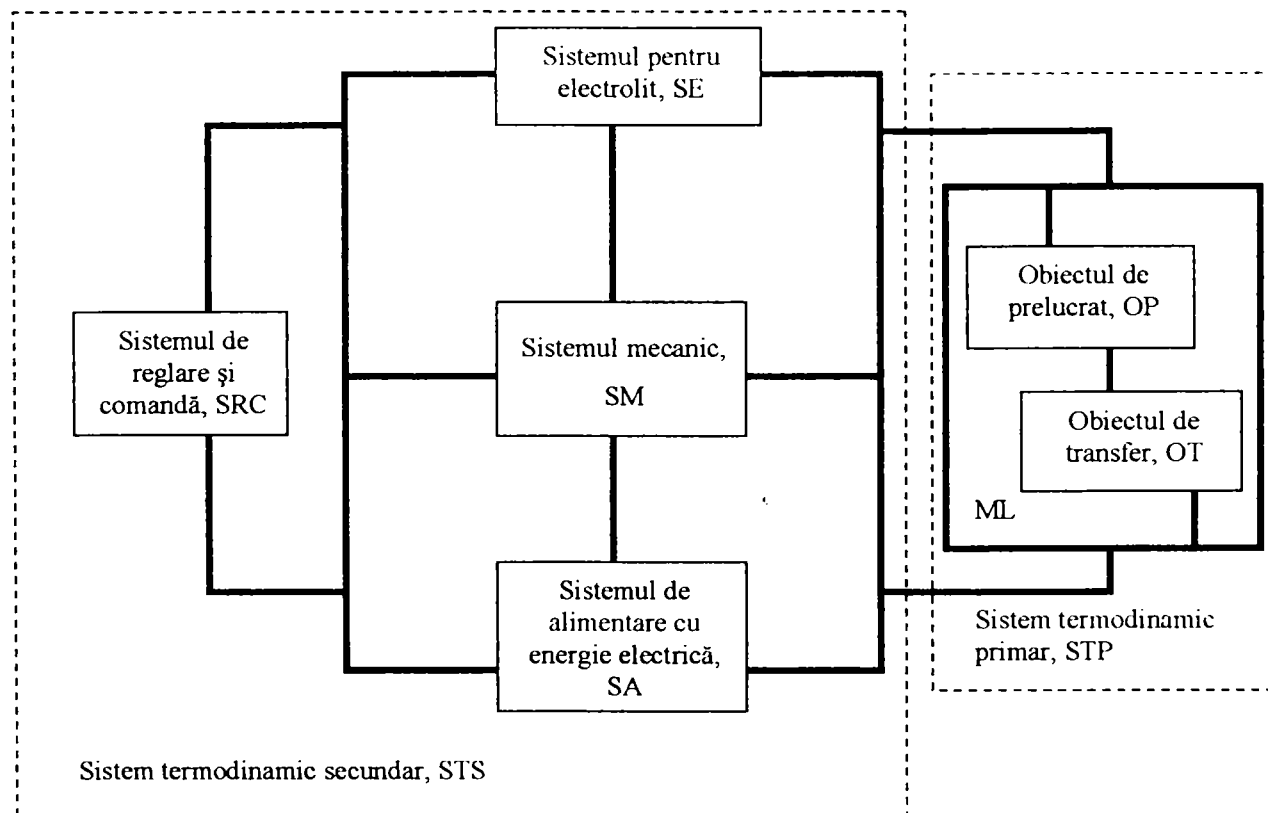


Fig.3.10. Schema de principiu a sistemului termodinamic general (STG)



Corelând figurile 3.9 și 3.10, în figura 3.11 se realizează schema de principiu a sistemului termodinamic primar cu evidențierea fenomenelor care determină schimbul energetic în sistem, unde  $Q_{OP}$ ,  $Q_{OT}$  și  $Q_{ML}$  reprezintă căldura dezvoltată la nivelul obiectului de prelucrat, a obiectului de transfer și a mediului de lucru, iar  $Q_{OP/OT}$ ,  $Q_{OP/ML}$  și  $Q_{OT/ML}$  căldura schimbată între cele trei elemente, luate două câte două.

Sunt și forme de energie care se manifestă în spațiul dintre elementele sistemului termodinamic primar:  $Q_{PT}$  ( $OP - OT$ ),  $Q_{PL}$  ( $OP - ML$ ),  $Q_{TL}$  ( $OT-ML$ ).

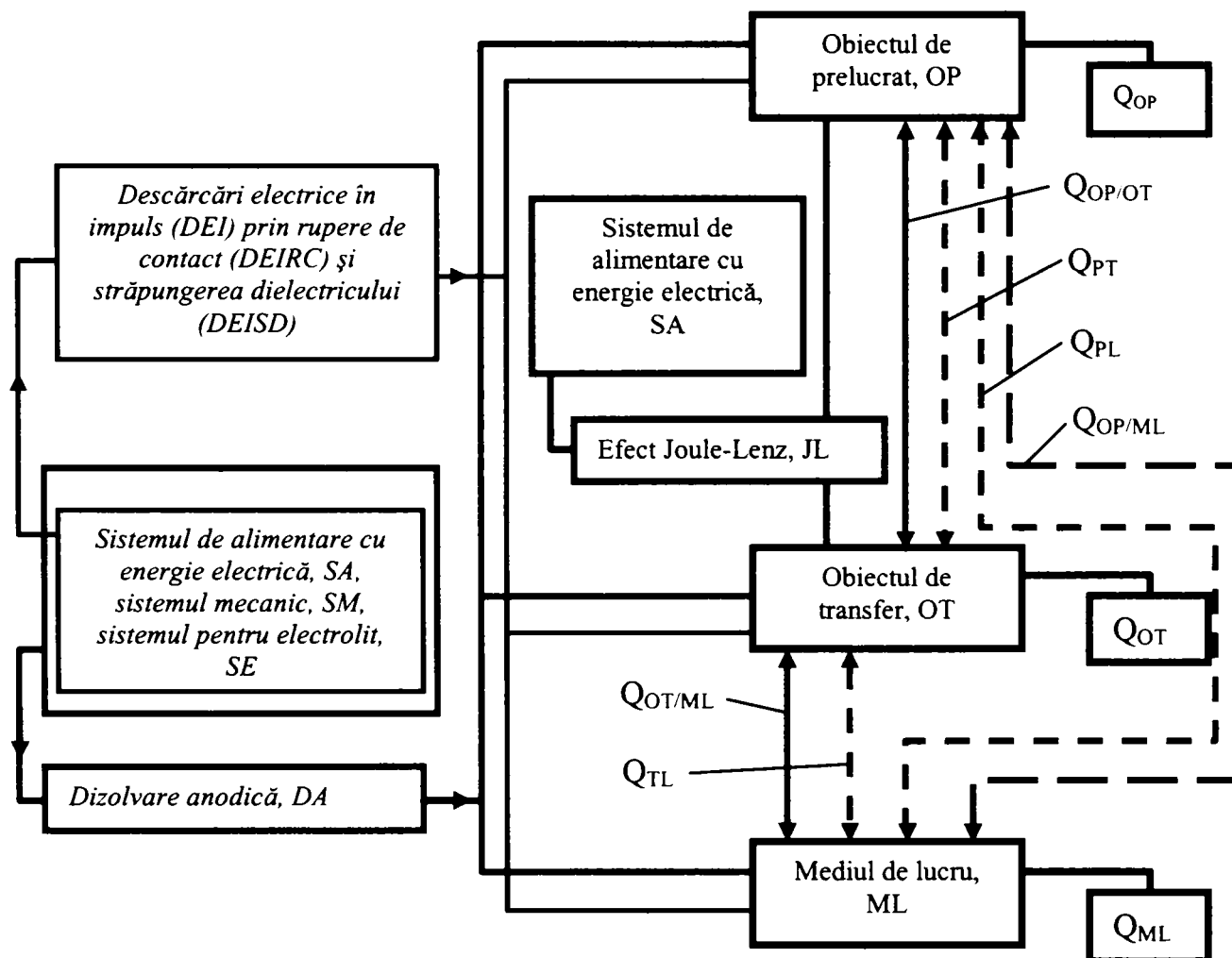


Fig. 3.11. Schema de principiu a sistemului termodinamic primar

### 3.5.2.2. Schimbul de căldură și bilanțul termoenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă în microsistemul obiect de prelucrat OP

Considerăm obiectul de prelucrat OP ca fiind un microsistem (MSOP) al sistemului termodinamic primar și pornind de la figura 3.11 reprezentăm bilanțul termoenergetic pentru obiectul de prelucrat, atât grafic (figura 3.12), cât și în expresie matematică (relația 3.47).

$$Q_I = Q_{OP} + Q_{OP/ML} + Q_{OP/OT} + Q_{PT} + Q_{PL} + Q_{pP} [J] \quad (3.47)$$

- unde:  $Q_I$  [J] – căldura schimbată la declanșarea și desfășurarea procesului de eroziune complexă;  
 $Q_{OP}$  [J] – căldura dezvoltată la nivelul obiectului de prelucrat;  
 $Q_{OP,ML}$  [J] – căldura obținută prin interacțiunea obiect de prelucrat-mediul de lucru;  
 $Q_{OP,OT}$  [J] – căldura obținută prin interacțiunea obiect de prelucrat – obiect de transfer;  
 $Q_{PT}$  [J] – căldura transmisă prin canalul descărcării;  
 $Q_{PL}$  [J] – căldura transmisă cu microparticulele în suspensie ca efect al eroziunii;  
 $Q_{pP}$  [J] – pierderile de căldură în microsistemul obiect de prelucrat.

Pentru simplificarea relațiilor matematice, notăm cu  $Q_{uP}$  suma căldurilor utile din microsistem:

$$Q_{uP} = Q_{OP} + Q_{OP,ML} + Q_{OP,OT} + Q_{PT} + Q_{PL} \text{ [J]} \quad (3.48)$$

iar simbolurile căldurilor schimbate devin:  $Q_{OP} = Q_{P_1}$ ,  $Q_{OP,ML} = Q_{P_2}$ ,  $Q_{OP,OT} = Q_{P_3}$ ,  $Q_{PT} = Q_{P_4}$ , și  $Q_{PL} = Q_{P_5}$ .

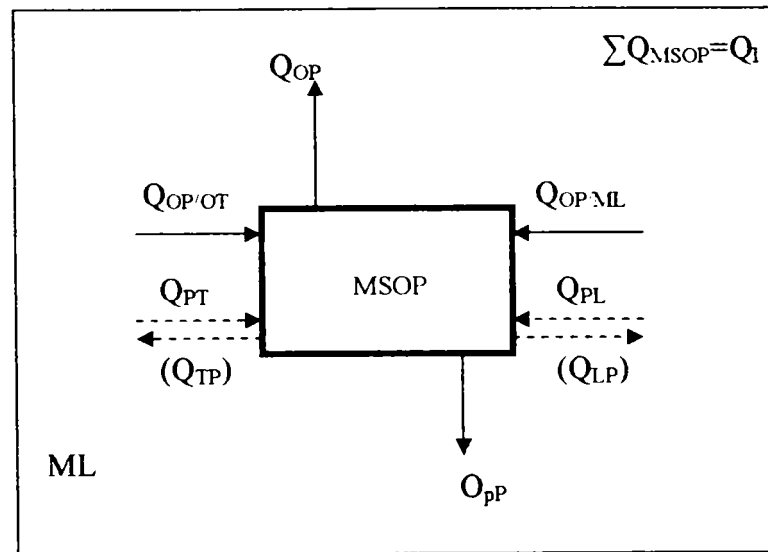


Fig. 3.12 Schema bilanțului termoenergetic pentru microsistemul obiect de prelucrat

Relația (3.48) devine:

$$Q_{uP} = Q_{P_1} + Q_{P_2} + Q_{P_3} + Q_{P_4} + Q_{P_5} \text{ [J]} \quad (3.49)$$

iar relația (3.49) poate fi scrisă sub forma:

$$Q_I = Q_{uP} + Q_{pP} \text{ [J]} \quad (3.50)$$

sau:

$$Q_I = Q_{P_1} + Q_{P_2} + Q_{P_3} + Q_{P_4} + Q_{P_5} + Q_{pP} \text{ [J]} \quad (3.51)$$

Corelând fenomenele care au loc la nivelul obiectului de prelucrat cu modurile în care se poate face schimb de căldură, să analizăm care dintre acestea se manifestă în cazul prelucrării prin eroziune complexă și ponderea lor estimativă.

La conectarea obiectului de transfer OT și a obiectului de prelucrat OP la sursa de curent continuu, în spațiul de lucru, în prezența mediului de lucru ML, apare câmpul electric orientat de la obiectul de prelucrat spre obiectul de transfer.

Particulele, încărcate electric, accelerate în câmpul de intensitate, ajung la suprafața electrozilor unde are loc transferul de energie. Energiile cinetice acumulate de particule în traiectoria lor dintre obiectul de transfer și obiectul de prelucrat sunt mari. La impact, surplusul de energie cedat obiectului de prelucrat este la rândul său mare ( $Q_{P_c}$ ). Dar principala parte a energiei este transmisă obiectului de prelucrat sub formă de energie termică ( $Q_{P_t}$ ), ca urmare a efectului Joule-Lenz. La suprafața obiectului de prelucrat crește agitația termică ( $Q_{P_a}$ ). Astfel, putem scrie:

$$Q_{P_1} = Q_{P_c} + Q_{P_t} + Q_{P_a} \text{ [J]} \quad (3.52)$$

Când puterea introdusă în spațiul de lucru este mică, prelevarea de material are loc, preponderent, ca urmare a dizolvării anodice.

Fenomenul dizolvării anodice constă în trecerea materialului din care este confecționat obiectul de prelucrat în soluție, reacțiile chimice fiind relativ simple. Gradul redus de solubilitate a produsului anodic obținut determină instaurarea stării pasive. Avem în acest caz o interacțiune între obiectul de prelucrat și mediul de lucru care participă direct la formarea peliculei pasivante, ca efect al dizolvării anodice. Căldura obținută prin interacțiunea obiect de prelucrat-obiect de transfer este constituită din cele două componente: căldura aferentă obiectului de prelucrat ( $Q_{P_2}$ ) și cea aferentă mediului de lucru ( $Q_{P_{2L}}$ ).

$$Q_{P_2} = Q_{P_{2p}} + Q_{P_{2L}} \text{ [J]} \quad (3.53)$$

Durata procesului de pasivizare a obiectului de prelucrat fiind mică, la parametrii electrici utilizați în procesul de prelucrare prin eroziune complexă, timpul este suficient pentru ca obiectul de transfer și obiectul de prelucrat să vină în contact datorită avansului de lucru.

Pentru îndepărtarea peliculei pasivante se realizează, între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer, o deplasare relativă cu viteza  $v_r$  și o presiune de contact suplimentară  $p_c$ . Apare astfel o frecare în urma căreia se realizează depasivarea forțată mecanică, cu îndepărtarea peliculei pasivante, creându-se condițiile favorabile apariției descărcărilor electrice în impuls.

În această etapă, căldura dezvoltată ca urmare a interacțiunii dintre obiectul de transfer și obiectul de prelucrat este compusă din căldura rezultată ca urmare a frecării dintre cei doi electrozi

( $Q_{P_3}$ ) și căldura obținută ca urmare a efectului Joule –Lenz, datorită curentului elementar  $I_e$  ce trece prin microcontactul realizat între cele două suprafețe, în finalul acestei etape ( $Q_{P_{3e}}$ ):

$$Q_{P_3} = Q_{P_{3f}} + Q_{P_{3e}} \text{ [J]} \quad (3.54)$$

Sub acțiunea mecanică a obiectului de transfer, la nivelul microasperităților se realizează îndepărtarea forțată a peliculei pasivante, creându-se condițiile apariției proceselor de eroziune prin declanșarea descărcărilor electrice în impuls.

Acestea, dezvoltându-se la nivelul microasperităților, determină apariția fenomenelor termice care duc la topirea explozivă a unor microvolume de material  $V$ , mai mari la obiectul de prelucrat  $V_P$  și mai mici la obiectul de transfer  $V_T$ . Se dezvoltă astfel în canalul descărcării căldura:

$$Q_{DEI} = Q_{PT} + Q_{TP} + Q_{PTL} \text{ [J]} \quad (3.55)$$

unde:  $Q_{PT}$  [J] – căldura transmisă prin canalul descărcării obiectului de prelucrat;

$Q_{TP}$  [J] – căldura transmisă prin canalul descărcării obiectului de transfer;

$Q_{PTL}$  [J] – căldura transmisă prin canalul descărcării mediului de lucru.

Între cele trei constituențe ale căldurii dezvoltate în canalul descărcării există relația de dependență:

$$Q_{PT} \gg Q_{TP} > Q_{PTL} \text{ [J]} \quad (3.56)$$

Căldura transmisă prin canalul descărcării obiectului de prelucrat ( $Q_{PT} = Q_{P_1}$ ) este rezultatul a două componente: căldura datorată efectului Joule-Lenz și care determină fenomenele termice la suprafața obiectului de prelucrat ( $Q_{P_{1z}}$ ), precum și căldura transmisă de particulele neutre din coloana de descărcare, încălzite în coloană și antrenate spre anod ( $Q_{P_{1c}}$ ):

$$Q_{P_1} = Q_{P_{1z}} + Q_{P_{1c}} \text{ [J]} \quad (3.57)$$

Ca urmare a fenomenelor dezvoltate în spațiul de lucru, între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer, se află în suspensie în mediul de lucru, cantități mai mari sau mai mici ale produselor eroziunii.

Căldura transmisă prin microparticulele în suspensie, ca efect al eroziunii ( $Q_{P_L} = Q_{P_2}$ ), este constituită din căldura transmisă de microvolumele de material desprinse din obiectul de prelucrat ca urmare a descărcării electrice în impuls ( $Q_{P_{2p}}$ ) și căldura transmisă de către obiectul de prelucrat mediului de lucru prin canalul descărcării ( $Q_{P_{2c}}$ ). Putem astfel scrie:

$$Q_{P_2} = Q_{P_{2p}} + Q_{P_{2c}} \text{ [J]} \quad (3.58)$$

Dar nu toată căldura dezvoltată sau introdusă în sistem se regăsește în ecuația de bilanț termic. În realitate apar schimburi de căldură ale microsistemului obiect de prelucrat cu

microsisteme adiacente care, pentru microsystemul considerat, constituie pierderi de energie proprii obiectului de prelucrat ( $Q_{P_p}$ ).

Sintetizând cele de mai sus se realizează reprezentarea schematică din figura 3.13.

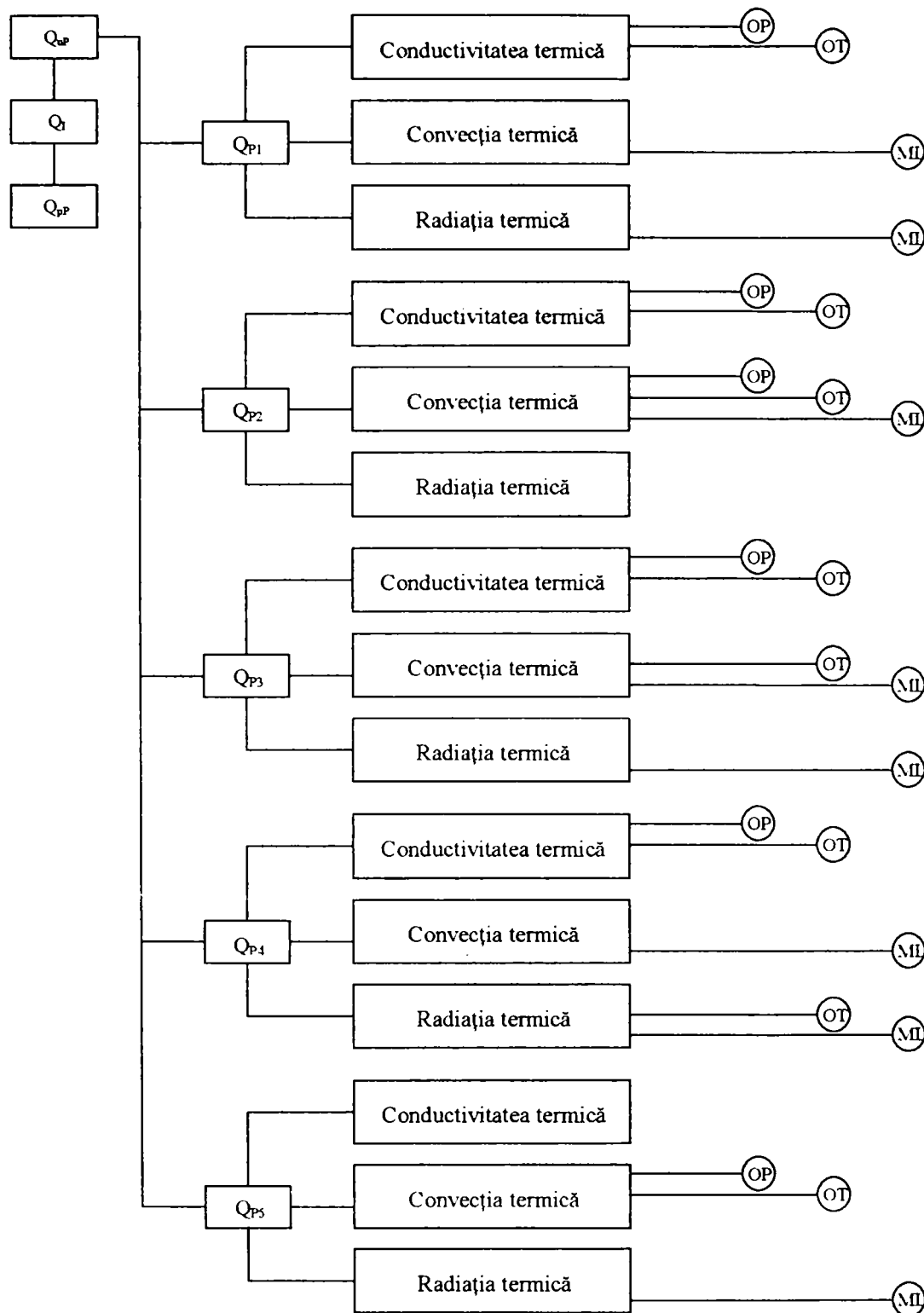


Fig 3.13. Schema de bilanț termoenergetic și moduri de transmitere a căldurii în microsystemul obiect de prelucrat

### 3.5.2.3. Schimbul de căldură și bilanțul termoenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă în microsistemul obiect de transfer OT

Prin analogie cu microsistemul obiect de prelucrat, considerăm obiectul de transfer ca fiind un microsistem (MSOT) al sistemului termodinamic primar.

Pomind de la figura 3.11 reprezentăm, de această dată, bilanțul termoenergetic pentru obiectul de transfer sub formă grafică (figura 3.14) și în expresie matematică (relația 3.59).

$$Q_{II} = Q_{OT} + Q_{OT:ML} + Q_{OP:OT} + Q_{TP} + Q_{TL} + Q_{pT} [J] \quad (3.59)$$

unde:  $Q_{II}$  [J] – căldura schimbată la declanșarea și desfășurarea procesului de eroziune complexă în microsistemul obiect de transfer MSOT;

$Q_{OT}$  [J] – căldura dezvoltată la nivelul obiectului de transfer;

$Q_{OT:ML}$  [J] – căldura dezvoltată prin interacțiunea obiect de transfer – mediu de lucru;

$Q_{OP:OT}$  [J] – căldura dezvoltată prin interacțiunea obiect de prelucrat – obiect de transfer;

$Q_{TP}$  [J] – căldura transmisă prin canalul descărcării;

$Q_{TL}$  [J] – căldura transmisă cu particulele în suspensie ca efect al eroziunii;

$Q_{pT}$  [J] – pierderile de căldură în microsistemul obiect de transfer.

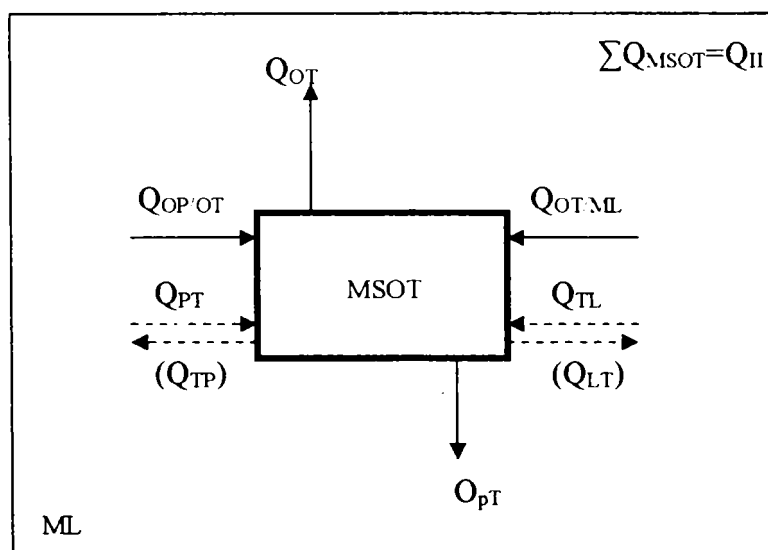


Fig. 3.14 Schema bilanțului termoenergetic pentru microsistemul obiect de transfer

Dacă notăm cu  $Q_{uT}$  suma căldurilor utile în microsistemul obiect de transfer obținem:

$$Q_{uT} = Q_{OT} + Q_{OT:ML} + Q_{OP:OT} + Q_{TP} + Q_{TL} [J] \quad (3.60)$$

și înlocuind în relația (3.60) avem:

$$Q_{II} = Q_{uT} + Q_{pT} [J] \quad (3.61)$$

Notând  $Q_{OT} = Q_{T1}$ ;  $Q_{OT:ML} = Q_{T2}$ ;  $Q_{OP:OT} = Q_{T3}$ ;  $Q_{TP} = Q_{T4}$  și  $Q_{TL} = Q_{T5}$  scriem:

$$Q_{II} = Q_{T1} + Q_{T2} + Q_{T3} + Q_{T4} + Q_{T5} + Q_{PT} \text{ [J]} \quad (3.62)$$

Particulele încărcate electric, accelerate între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer, ajung la suprafața acestora cedând, în momentul impactului, surplusul de energie cinetică. Fenomenul are pondere mare în cazul obiectului de prelucrat.

La obiectul de transfer se orientează particulele încărcate pozitiv care, fiind accelerate mult mai puțin decât particulele încărcate negativ, în timpul desfășurării procesului ajung în cantitate mai mică pe suprafața obiectului de transfer. Prin urmare, căldura transmisă prin cedarea energiei cinetice obiectului de transfer  $Q_{T1c}$  este mult mai mică decât cea transmisă obiectului de prelucrat. În același raport se găsesc și căldura transmisă sub formă de energie termică ca urmare a efectului Joule-Lenz ( $Q_{T1l}$ ), respectiv cea datorată agitației termice ( $Q_{T1a}$ ):

$$Q_{T1} = Q_{T1c} + Q_{T1l} + Q_{T1a} \text{ [J]} \quad (3.63)$$

În ceea ce privește interacțiunea dintre obiectul de transfer și mediul de lucru, prin analogie cu schimbul de energie realizat la interacțiunea obiect de prelucrat – mediu de lucru, putem scrie:

$$Q_{T2} = Q_{T2t} + Q_{T2l} \text{ [J]} \quad (3.64)$$

unde:  $Q_{T2t}$  [J] – componenta căldurii dezvoltate în interacțiunea obiect de transfer – mediu de lucru ce se transmite obiectului de transfer;

$Q_{T2l}$  [J] – componenta căldurii dezvoltate în interacțiunea obiect de transfer – mediu de lucru ce se transmite mediului de lucru.

Interacțiunea dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer, în momentul îndepărtării peliculei pasivante și a apariției descărcărilor electrice în impuls, determină dezvoltarea unei energii care se transmite obiectului de prelucrat (relația 4.29) și cotă parte obiectului de transfer:

$$Q_{T3} = Q_{T3f} + Q_{T3e} \text{ [J]} \quad (3.65)$$

unde:  $Q_{T3f}$  [J] – componenta transmisă obiectului de prelucrat din căldura dezvoltată ca urmare a frecării dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer;

$Q_{T3e}$  [J] – căldura transmisă obiectului de transfer prin efect Joule Lenz, datorită curentului elementar ce trece prin microcontactul realizat între suprafețele obiectului de prelucrat și obiectul de transfer.

Căldura dezvoltată ca urmare a descărcărilor electrice în impuls se transmite și obiectului de transfer prin canalul descărcării:

$$Q_{T4} = Q_{T4t} + Q_{T4c} \text{ [J]} \quad (3.66)$$

unde:  $Q_{T4t}$  [J] – căldura transmisă obiectului de transfer prin canalul descărcării ca urmare a efectului Joule Lenz;

$Q_{T4c}$  [J] – căldura transmisă obiectului de transfer prin canalul descărcării, ca urmare a particulelor neutre din coloana descărcării, încălzite și antrenate spre catod.

Comparând cu fenomenul descris în cazul obiectului de prelucrat și exprimat prin relația 3.60, putem scrie:

$$Q_{T5} = Q_{T5t} + Q_{T5p} [J] \quad (3.67)$$

unde:  $Q_{T5t}$  [J] – căldura transmisă obiectului de transfer de către microvolumele de material desprinse din obiectul de transfer, ca urmare a descărcării electrice în impuls;

$Q_{T5p}$  [J] – căldura transmisă de către obiectul de transfer mediului de lucru prin canalul descărcării.

Pentru închiderea bilanțului termoenergetic la nivelul microsistemului obiect de transfer, se consideră  $Q_{pT}$  pierderile de căldură proprii obiectului de transfer. Astfel putem sintetiza schimburile de căldură la nivelul microsistemului obiect de transfer, conform reprezentării din figura 3.15.

#### 3.5.2.4. Schimbul de căldură și bilanțul termoenergetic la prelucrarea prin eroziune complexă în microsistemul mediu de lucru ML

Considerăm mediul de lucru ca fiind un microsistem (MSML) al sistemului termodinamic primar. Prin analogie cu figurile 3.11 și 3.14 reprezentăm (figura 3.16) schema bilanțului termoenergetic pentru microsistemul mediu de lucru, iar în relația 3.69 expresia sa matematică:

$$Q_{III} = Q_{ML} + Q_{OPML} + Q_{OTML} + Q_{pL} [J] \quad (3.68)$$

unde:  $Q_{III}$  [J] – căldura schimbată la declanșarea și desfășurarea procesului de eroziune complexă în microsistemul mediu de lucru;

$Q_{ML}$  [J] – căldura dezvoltată în mediul de lucru;

$Q_{OPML}$  [J] – căldura obținută prin interacțiunea obiect de prelucrat – mediu de lucru;

$Q_{OTML}$  [J] – căldura obținută prin interacțiunea obiect de transfer – mediu de lucru;

$Q_{pL}$  [J] – pierderile de căldură în microsistemul mediu de lucru.

Notăm cu  $Q_{uL}$  – căldura utilă din microsistemul mediu de lucru.

$$Q_{uL} = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3} [J] \quad (3.69)$$

Simbolurile căldurilor schimbate devin:  $Q_{L1} = Q_{ML}$ ,  $Q_{L2} = Q_{OPML}$ ,  $Q_{L3} = Q_{OTML}$  și relația 3.69 se scrie în forma:

$$Q_{III} = Q_{uL} + Q_{pL} [J] \quad (3.70)$$

respectiv:

$$Q_{III} = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3} + Q_{pL} [J] \quad (3.71)$$

Ținând cont de analiza făcută la nivelul microsistemului obiect de prelucrat și la nivelul microsistemului obiect de transfer privind schimbul de căldură, se încearcă precizarea modurilor în care se face schimb termic în microsistemul mediu de lucru.



Lichidul de lucru este introdus în spațiul de desfășurare a procesului de prelucrare la temperatura mediului ambiant. Are loc un schimb termic la o diferență de temperatură ne semnificativă (deci și schimbul de căldură este ne semnificativ) între lichidul de lucru și suprafața incintei ( $Q_{L1c}$ ) și un schimb termic între mediul de lucru și obiectul de prelucrat ( $Q_{L1o}$ ), respectiv mediul de lucru și obiectul de transfer ( $Q_{L1T}$ ). Astfel, căldura dezvoltată în mediul de lucru devine:

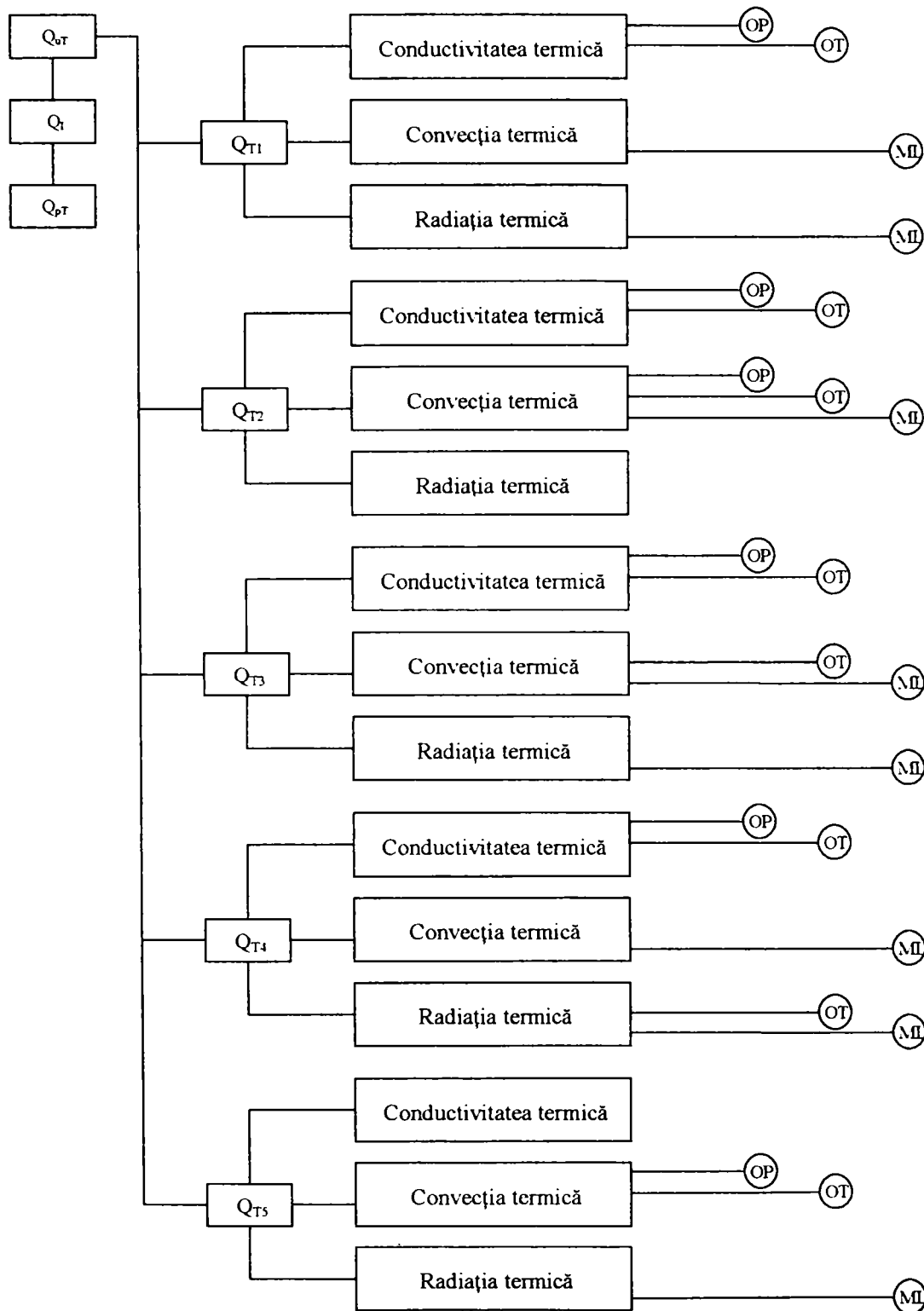


Fig. 3.15. Schema de bilanț termoenergetic și moduri de transmitere a căldurii în microsistemul obiect de transfer

$$Q_{L1} = Q_{L1i} + Q_{L1p} + Q_{L1T} \text{ [J]} \quad (3.72)$$

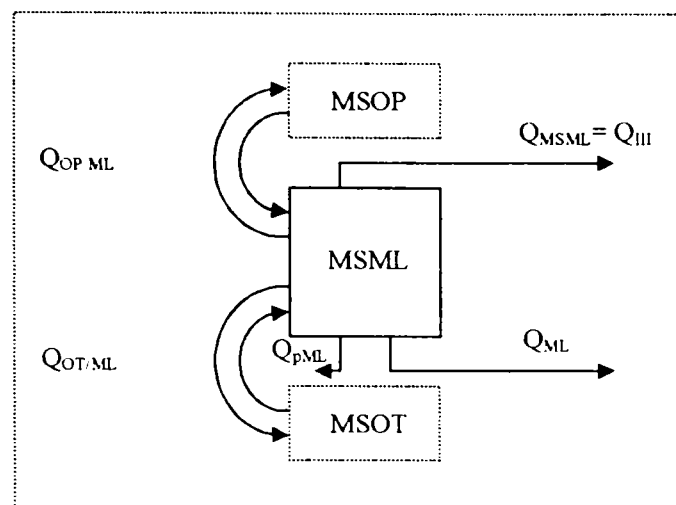


Fig. 3.16. Schema bilanțului termoenergetic pentru microsistemul mediu de lucru

La aceasta se adaugă componenta căldurii dezvoltate în interacțiunea obiect de prelucrat – mediu de lucru ce se înmagazinează în mediul de lucru ( $Q_{L3}$ ):

$$Q_{L2} = Q_{L2p} + Q_{L2c} \text{ [J]} \quad (3.73)$$

unde:  $Q_{L3t}$  [J] – căldura înmagazinată în mediul de lucru prin conținutul de căldură al materialului dislocat din obiectul de prelucrat;

$Q_{L3c}$  [J] – căldura transmisă în mediul de lucru din canalul descărcării în zona obiectului de transfer.

Bilanțul termoenergetic realizat în microsistemul mediu de lucru este reprezentat schematizat în figura 3.17.

### 3.6. Studiul bilanțului energetic pentru componentele sistemului termodinamic primar

#### 3.6.1. Studiul bilanțului energetic pentru microsistemul obiect de prelucrat OP

La nivelul *microsistemului obiect de prelucrat* se dezvoltă energia  $W_{OP}$ . Ca urmare a interacțiunii obiect de prelucrat – obiect de transfer se dezvoltă energia  $W_{OP/OT}$  iar ca urmare a interacțiunii obiect de prelucrat – mediu de lucru se dezvoltă energia  $W_{OP,ML}$ . De asemenea, se pune în evidență energia transmisă prin canalul descărcării  $W_{PT}$  și cea transmisă cu microparticulele în suspensie, ca efect al eroziunii  $W_{PL}$ . Notând pierderile de energie în microsistemul obiect de prelucrat  $W_{pP}$ , expresia matematică a bilanțului energetic în microsistemul obiect de prelucrat este:

$$W_{MSOP} = W_{OP} + W_{OP/ML} + W_{OP/OT} + W_{PT} + W_{PL} + W_{pP} \text{ [J]} \quad (3.74)$$

Schematizat, componentele bilanțului energetic pentru microsystemul obiect de prelucrat se reprezintă în figura 3.18.

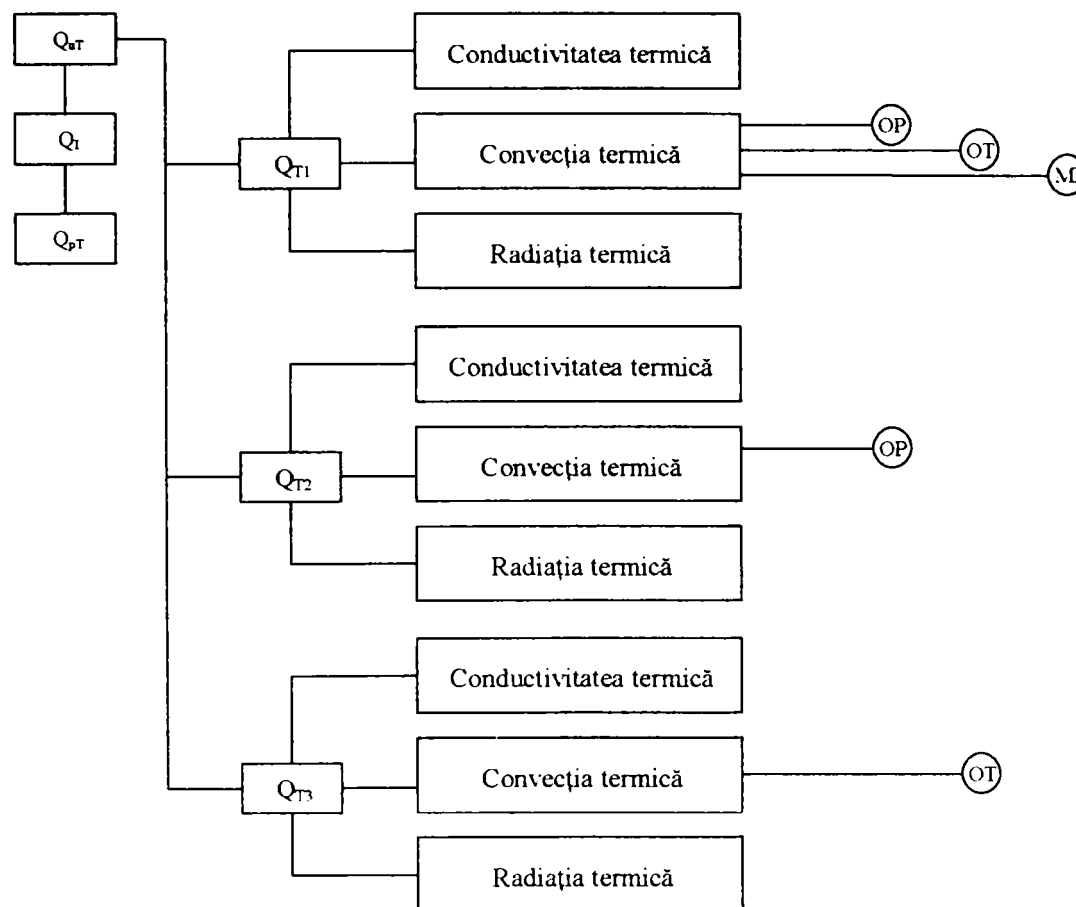


Fig. 3.17. Schema de bilanț termoenergetic și moduri de transmitere a căldurii în microsystemul mediu de lucru

### 3.6.2. Studiul bilanțului energetic pentru microsystemul obiect de transfer OT

La nivelul obiectului de transfer ce formează *microsystemul obiect de transfer* se dezvoltă energia  $W_{OT}$ , iar ca urmare a interacțiunii acestuia cu obiectul de prelucrat, respectiv cu mediul de lucru, este dezvoltată energia  $W_{OP/OT}$ , respectiv  $W_{OT/ML}$ . Prin canalul descărcării se transmite energia  $W_{TP}$  iar cu microparticulele în suspensie, ca efect al eroziunii, se transmite energia  $W_{TL}$ . Notăm  $W_{pT}$  pierderile de energie în microsystemul obiect de transfer, iar expresia matematică a bilanțului energetic pentru acesta devine:

$$W_{MSOT} = W_{OT} + W_{OT/ML} + W_{OP/OT} + W_{PT} + W_{TP} + W_{TL} + W_{pT} \text{ [J]} \quad (3.75)$$

Componentele bilanțului energetic pentru microsistemul obiect de transfer sunt reprezentate schematizat în figura 3.18.

### 3.6.3. Studiul bilanțului energetic pentru microsistemul mediu de lucru ML

Energia dezvoltată în mediul de lucru (*microsistemul mediu de lucru*) este  $W_{ML}$ , energia obținută prin interacțiunea obiectului de prelucrat cu mediul de lucru  $W_{OP:ML}$  și energia obținută prin interacțiunea obiectului de transfer cu mediul de lucru  $W_{OT:ML}$ . Dacă notăm  $W_{pML}$  pierderile de energie în microsistemul mediu de lucru, expresia matematică a bilanțului energetic pentru microsistemul mediu de lucru devine:

$$W_{MSML} = W_{ML} + W_{OP:ML} + W_{OT:ML} + W_{pML} \quad [J] \quad (3.76)$$

Componentele bilanțului energetic pentru microsistemul mediu de lucru se reprezintă schematizat în figura 3.18.

### 3.6.4. Componentele bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar

Sistemul termodinamic primar fiind alcătuit din cele trei micro sisteme elementare, pentru a stabili componentele bilanțului energetic al sistemului termodinamic primar precum și schema bilanțului energetic, facem reuniunea componentelor energetice ale fiecărui bilanț energetic elementar.

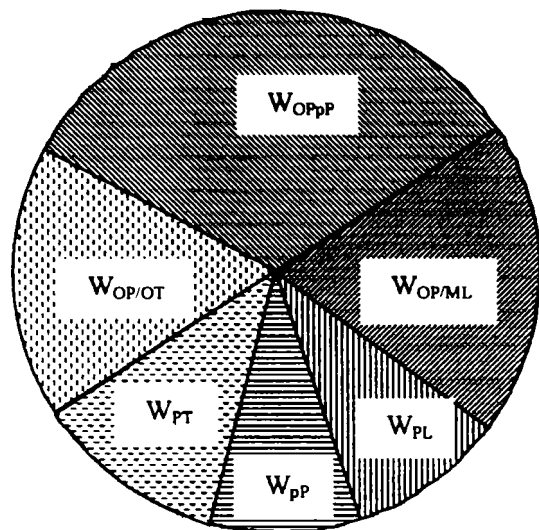
$$W_{STP} = W_{MSOP} \cup W_{MSOT} \cup W_{MSML} \quad [J] \quad (3.77)$$

$$W_{STP} = (W_{OP} + W_{OP:ML} + W_{OP:OT} + W_{PT} + W_{PL} + W_{pP}) \cup \\ \cup (W_{OT} + W_{OT:ML} + W_{OT:OT} + W_{PT} + W_{TP} + W_{TL} + W_{pT}) \cup \\ \cup (W_{ML} + W_{OP:ML} + W_{OT:ML} + W_{pML}) \quad [J] \quad (3.78)$$

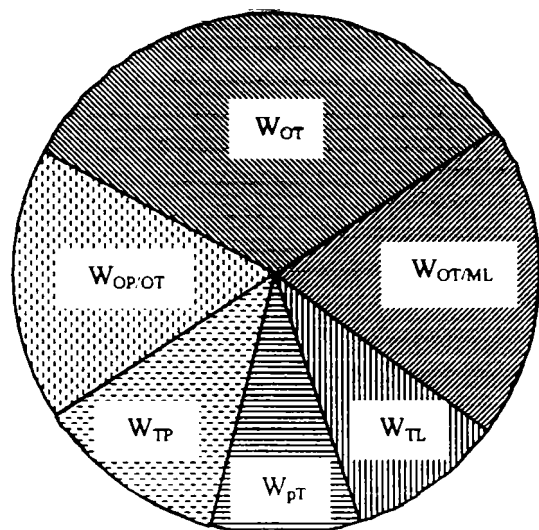
Cum însă  $W_{PT} = W_{TP} = W_{CD}$ , relația 3.79 devine:

$$W_{STP} = W_{OP} + W_{OT} + W_{ML} + W_{OP:OT} + W_{OP:ML} + W_{OT:ML} + W_{CD} + W_{PL} + W_{TL} + W_{pP} + W_{pT} + W_{pML} \\ [J] \quad (3.79)$$

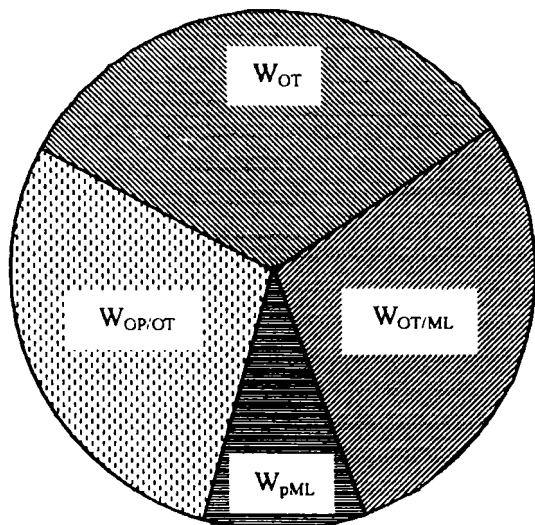
Ținând seama de cele de mai sus, se realizează schema componentelor bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar (figura 3.19):



Schema componentelor bilanțului energetic pentru microsystemul obiect de prelucrat



Schema componentelor bilanțului energetic pentru microsystemul obiect de transfer



Schema componentelor bilanțului energetic pentru microsystemul mediu de lucru

Fig.3.18. Componentele bilanțului energetic pentru microsystemul obiect de prelucrat, obiect de transfer și mediu de lucru

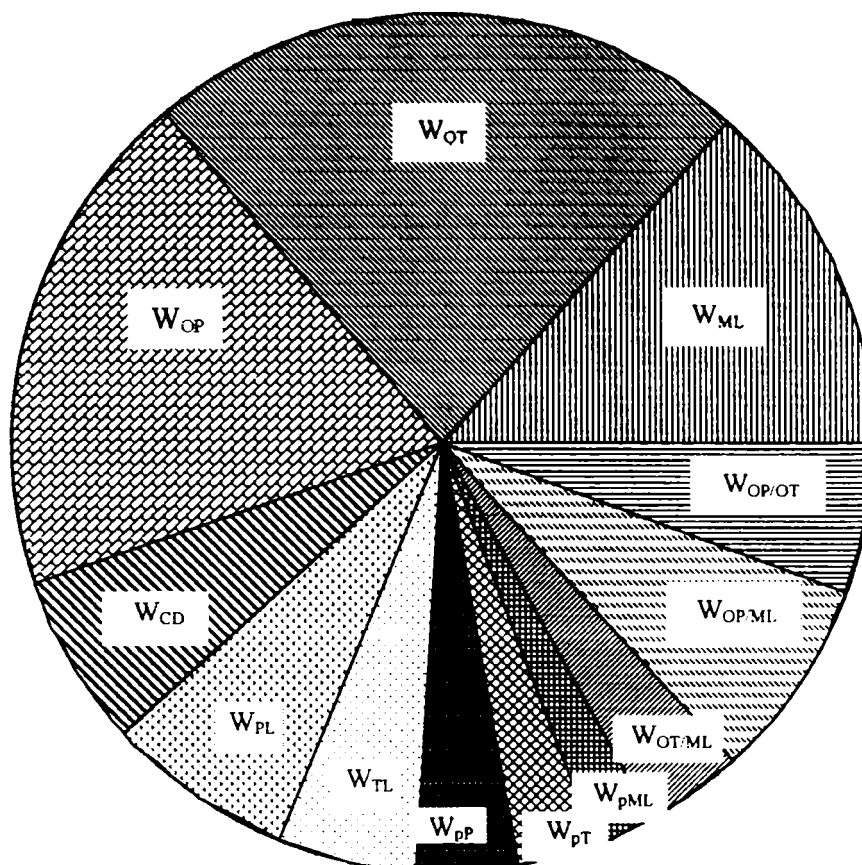


Fig.3.19. Schema componentelor bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar

### 3.6.5. Expresia analitică a componentelor bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar

În vederea determinării expresiei analitice a componentelor bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar și utilizând datele analizei realizate anterior, se întocmește tabelul 3.1 care centralizează expresiile analitice ale componentelor bilanțului energetic pentru fiecare microsistem al sistemului termodinamic primar.

### 3.6.6. Rolul factorilor de influență la prelucrarea prin eroziune complexă în determinarea bilanțului energetic

Complexitatea procesului de prelucrare eroziune complexă [38, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 59, 60, 61] este pusă în evidență și de numărul mare al factorilor ce influențează acest proces, atât cei determinanți, cât și cei determinați, în strânsă interdependență.

Rolul lor fiind hotărâtor în declanșarea și desfășurarea procesului de eroziune complexă, se impune analiza modului în care aceștia intervin în schimbul energetic.

Tab. 3.1

## Centralizarea componentelor bilanțului energetic pentru sistemul termodinamic primar

Nr. crt	Componente de bilanț		Expresie matematică
	Simbol	Denumire	
0	1	2	3
1	$W_{OP}[J]$	Energia dezvoltată la nivelul obiectului de prelucrat	$W_{OP} = W_{Pc} + W_{Pt} + W_{Pa} + W_{Pn}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_{Pc}</math> – energia cinetică cedată obiectului de prelucrat de către particulele, încărcate electric, accelerate în câmpul de intensitate E;</li> <li>• <math>W_{Pt}</math> – energia termică transmisă obiectului de prelucrat, ca urmare a efectului Joule-Lenz;</li> <li>• <math>W_{Pa}</math> – energia dezvoltată la suprafața obiectului de prelucrat ca urmare a creșterii agitației termice;</li> <li>• <math>W_{Pn}</math> – energia transmisă obiectului de prelucrat de particulele neutre din coloana de descărcare.</li> </ul>
2	$W_{OT}[J]$	Energia dezvoltată la nivelul obiectului de transfer	$W_{OT} = W_{Tc} + W_{Tt} + W_{Ta} + W_{Tn}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_{Tc}</math> – energia cinetică cedată obiectului de transfer de către particulele, încărcate electric, accelerate în câmpul de intensitate E;</li> <li>• <math>W_{Tt}</math> – energia termică transmisă obiectului de transfer, ca urmare a efectului Joule-Lenz;</li> <li>• <math>W_{Ta}</math> – energia dezvoltată la suprafața obiectului de transfer ca urmare a creșterii agitației termice;</li> <li>• <math>W_{Tn}</math> – energia transmisă obiectului de transfer de particulele neutre din coloana de descărcare.</li> </ul>
	$W_{ML}[J]$	Energia dezvoltată în mediul de lucru	$W_{ML} = W_{Lc} + W_{LP} + W_{LT}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_{Lc}</math> – energia schimbată între lichidul de lucru și suprafața incintei;</li> <li>• <math>W_{LP}</math> – energia schimbată între lichidul de lucru și obiectul de prelucrat;</li> <li>• <math>W_{LT}</math> – energia schimbată între lichidul de lucru și obiectul de transfer.</li> </ul>
4	$W_{OP/OT}[J]$	Energia obținută ca urmare a interacțiunii obiect de prelucrat – obiect de transfer	$W_{OP/OT} = W_f + W_e$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_f</math> – energia dezvoltată ca urmare a frecării dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer;</li> <li>• <math>W_e</math> – energia dezvoltată între cei doi electrozi ca urmare a efectului Joule-Lenz.</li> </ul>
5	$W_{OP/ML}[J]$	Energia obținută ca urmare a interacțiunii obiect de prelucrat – mediu de lucru	$W_{OP/ML} = W_p + W_{Lp}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_p</math> – energia înmagazinată în obiectul de prelucrat la formarea peliculei pasive;</li> <li>• <math>W_{Lp}</math> – energia înmagazinată în mediul de lucru ca urmare a interacțiunii sale cu obiectul de prelucrat.</li> </ul>
6	$W_{OT/ML}[J]$	Energia obținută ca urmare a interacțiunii obiect de transfer – mediu de lucru	$W_{OT/ML} = W_T + W_{LT}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_T</math> – energia înmagazinată în obiectul de transfer ca urmare a interacțiunii sale cu mediul de lucru;</li> <li>• <math>W_{LT}</math> – energia înmagazinată în mediul de lucru ca urmare a interacțiunii sale cu obiectul de transfer.</li> </ul>



0	1	2	3
7	$W_{CD}[J]$	Energia dezvoltată în canalul descărcării	$W_{CD} = W_{CDp} + W_{CDT} + W_{CDL}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_{CDp}</math> – energia transmisă prin canalul descărcării obiectului de prelucrat;</li> <li>• <math>W_{CDT}</math> – energia transmisă prin canalul descărcării obiectului de transfer;</li> <li>• <math>W_{CDL}</math> – energia transmisă prin canalul descărcării mediului de lucru.</li> <li>• Obs.: <math>W_{CDp} &gt; W_{CDT} \gg W_{CDL}</math></li> </ul>
8	$W_{PL}[J]$	Energia transmisă cu microparticulele desprinse din obiectul de prelucrat ca urmare a descărcării electrice în impuls	$W_{PL} = W_{PLp} + W_{PLL}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_{PLp}</math> – energia înmagazinată în microvolumele de material desprinse din obiectul de prelucrat ca urmare a descărcării electrice în impuls;</li> <li>• <math>W_{PLL}</math> – energia transmisă mediului de lucru de către microvolumele de material desprinse din obiectul de prelucrat.</li> </ul>
9	$W_{TL}[J]$	Energia transmisă cu microparticulele desprinse din obiectul de transfer ca urmare a descărcării electrice în impuls	$W_{TL} = W_{TLT} + W_{TLL}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_{TLT}</math> – energia înmagazinată în microvolumele de material desprinse din obiectul de transfer ca urmare a descărcării electrice în impuls;</li> <li>• <math>W_{TLL}</math> – energia transmisă mediului de lucru de către microvolumele de material desprinse din obiectul de transfer.</li> </ul>
10	$W_p[J]$	Energia pierdută de sistemul termodinamic primar în procesul de eroziune complexă	$W_p = W_{pP} + W_{pT} + W_{pML}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>W_{pP}</math> – energia pierdută în microsistemul obiect de prelucrat;</li> <li>• <math>W_{pT}</math> – energia pierdută în microsistemul obiect de transfer;</li> <li>• <math>W_{pML}</math> – energia pierdută în microsistemul mediul de lucru.</li> </ul>

a) Rolul factorilor de influență de natură electrică

În figura 3.20 este reprezentată interdependența unor parametri de proces ce se constituie în factori determinanți ai prelucrării și factorii de influență de natură electrică, precum și componentele schimbului energetic unde aceștia intervin.

b) Rolul factorilor de influență de natură mecanică

În mod similar factorilor de influență de natură electrică, se face analiza interdependenței unor parametri de proces, a factorilor determinanți ai procesului de eroziune complexă și a factorilor de influență de natură mecanică pe care aceștia îi determină, cu elementele componente ale schimbului energetic influențate de aceștia (figura 3.21)

Se analizează și ceilalți factori de influență, luați ca factori determinanți:

- materialul și caracteristicile geometrice ale obiectului de prelucrat;
- materialul și caracteristicile geometrice ale obiectului de transfer;



- natura mediului de lucru;
- structura sistemului tehnic;
- schema de generare a suprafețelor;
- operatorul uman;
- mediul înconjurător.

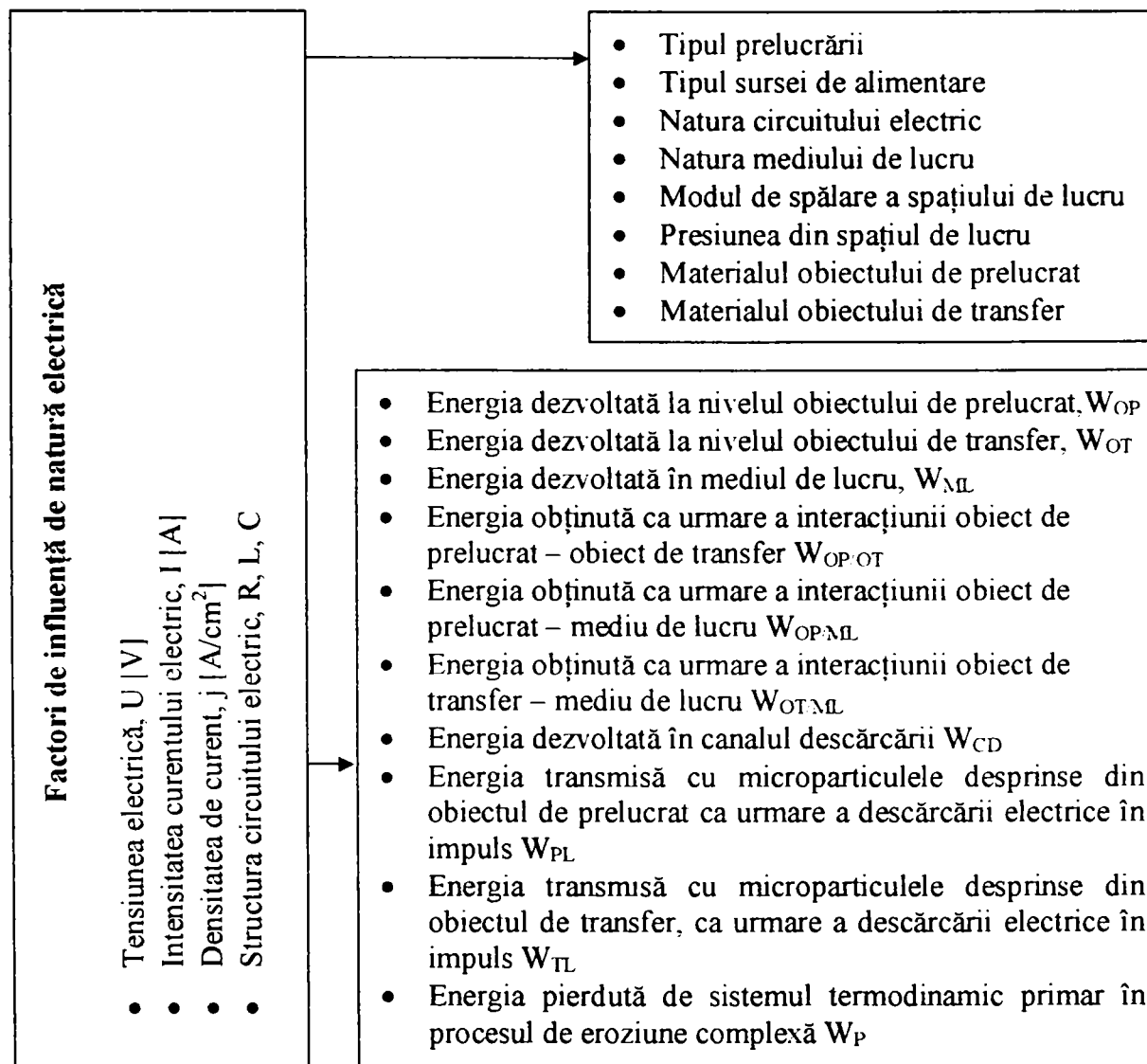


Fig. 3.20. Schema interdependenței factorilor de influență de natură electrică

Se constată că aceștia nu au o determinare energetică directă în sistemul termodinamic primar. Unii intervin însă ca factori determinanți ai factorilor de influență de natură electrică sau a celor de natură mecanică. Prin urmare, rolul lor în influențarea schimbului energetic se manifestă doar prin influențele în componentele de natură electrică și mecanică.

### 3.7. Noțiuni generale privind elaborarea bilanțurilor energetice la prelucrarea prin eroziune complexă cu ajutorul programelor informatice

Întocmirea bilanțurilor energetice la prelucrarea prin eroziune complexă cu rezolvarea modelului matematic este suficient de laborioasă pentru a reclama, în acest scop, utilizarea programelor informatice. Acestea urmăresc:

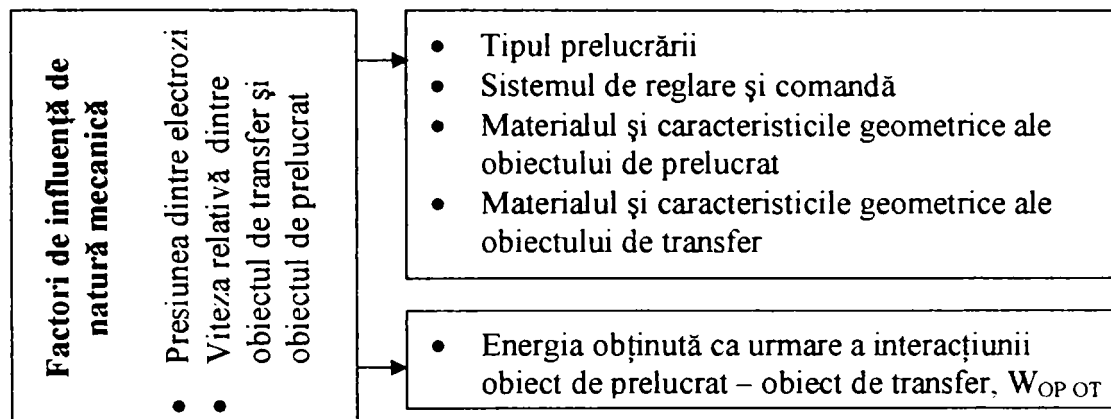


Fig. 3.21. Schema interdependenței factorilor de influență de natură mecanică cu componentele schimbului energetic

a) Crearea bazei de date și a fișierelor de informații, care presupune:

- Identificarea proceselor;
- Prelevarea datelor;
- Prelucrarea informațiilor;
- Selectarea informațiilor;
- Depozitarea informațiilor în fișiere.

b) Determinarea structurii rețelei de calculatoare la nivelul sistemului analizat

Fișierele, cu toate informațiile pe care le conțin, formează baza de date a bilanțului energetic. Acțiunea de formare a bazei de date trebuie realizată sistemic, pornind de la consumatorul de energie și, prin parcurgerea lanțurilor energetice, ajungându-se la nivelul surselor de energie.

Identificarea proceselor energetice presupune cunoașterea tuturor caracteristicilor funcționale ale sistemului termodinamic (sistemul termodinamic primar) cercetat prin intermediul mărimilor de stare și a parametrilor fiecărui fenomen din cadrul proceselor ce au loc în cadrul respectivului sistem. Pentru o mai bună identificare a proceselor se stabilesc legăturile ce există între parametrii de stare ai sistemului și factorii lor de influență. După realizarea acestor identificări se trece la constituirea modelului de bilanț care trebuie să reflecte situația energetică, atât în interiorul procesului analizat, cât și la interfața sa cu mediul.

Prelevarea datelor pentru elaborarea bilanțului energetic la prelucrarea prin eroziune complexă se realizează prin măsurători. Acestea trebuie realizate cu o precizie în limita erorilor aparatelor de prelevare a datelor din proces. Pe baza prelevării datelor, se poate stabili structura fluxului informațional de la nivelul fiecărui contur de bilanț.

După prelevarea lor, datele se prelucrează și se organizează pe fișiere, conform unei structuri a fluxului informațional integrat. Durata de prelevare a datelor trebuie astfel aleasă încât informațiile culese să redea aspectele caracteristice ale regimurilor de funcționare a sistemului energetic analizat.

Fluxul de date prelevat trebuie să fie cât mai clar și să poată fi utilizat cu eficiență maximă în procesul de prelucrare automată a informațiilor. Astfel, elaborarea bilanțului energetic reclamă:

- examinarea în detaliu a fiecărei faze a proceselor energotehnologice și întocmirea schemelor de bilanț, atât la nivelul circulației purtătorilor de energie, cât și la nivelul legăturilor dintre punctele de alimentare și cele privind consumurile energetice;
- analiza regimurilor de funcționare în vederea precizării regimului caracteristic al procesului energoenergetic cercetat;
- stabilirea conturului de bilanț și precizarea structurii schemei energotehnologice a punctelor de măsură, inclusiv a structurii aparatelor pentru prelevarea datelor necesare determinării mărimilor de calcul din structura bilanțului analizat;
- efectuarea măsurătorilor și prelucrarea informațiilor prelevate din procesul energoenergetic analizat;
- elaborarea asistată de calculator a bilanțului energetic.

Realizarea unui flux informațional la nivelul subsistemelor înlesnește elaborarea, în concepție sistemică, a bilanțului energetic.

## 4. METODE DE STUDIU A CÂMPULUI TERMIC LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ

### 4.1. Considerații generale

În orice domeniu de activitate există o legătură strânsă între latura teoretică a acesteia și latura practică, aplicativă, aspect ce se remarcă, în mod deosebit, în cercetarea științifică, iar cercetarea științifică tehnică se bazează pe unitatea indisolubilă dintre studiile teoretice și cercetarea experimentală [3, 17, 95].

Prin studiile teoretice se stabilește interdependența dintre diferiții parametri ai proceselor tehnice, a legilor ce stau la baza fenomenelor urmărite, utilizând aparatul matematic și realizările din domeniul respectiv sau din domeniile conexe.

Verificarea adevărului ipotezelor și teoriilor ce au stat la baza studiilor efectuate se poate realiza prin cercetarea experimentală a fenomenelor.

În prezent se dezvoltă și cercetarea mixtă care cuprinde elementele studiilor teoretice (pornind de la modele matematice prestabilite, pe baza cunoștințelor din domeniu) în strânsă corelație cu elemente ale cercetării experimentale (coeficienții modelelor se stabilesc experimental).

Cercetarea teoretică, în cazul unor sisteme complexe cum este sistemul termodinamic primar la prelucrarea prin eroziune complexă, este foarte dificilă, ea implicând o multitudine de factori. Abordarea teoretică în această situație presupune utilizarea unor ipoteze simplificatoare care, într-o anumită măsură, îndepărtează modelele obținute de situația reală.

Pentru realizarea unei cercetări științifice moderne este necesară planificarea și organizarea acesteia, ceea ce presupune definirea programului general al cercetării în acord cu obiectivele și termenele propuse. Se urmărește în acest sens orientarea corectă a cercetării, atât ca obiectiv, pentru a nu repeta cercetări deja întreprinse, cât și ca mod de abordare, pentru a evita eventualele erori.

Pentru a pune mai bine în evidență etapele planificării și organizării activității de cercetare științifică, marcând totodată și interconexiunile existente, se realizează în figura 4.1 schema unui astfel de program.

În orice cercetare științifică se urmărește determinarea legăturilor ce se stabilesc între parametrii de stare (inițială și finală) ai sistemului analizat și factorii care influențează procesele (fenomenele) ce se desfășoară în sistemul respectiv.

Acestea implică o fragmentare a realității, o limitare în timp și spațiu a fenomenului studiat. De asemenea, complexitatea fenomenelor, a proceselor tehnologice, impune introducerea unor ipoteze simplificatoare și utilizarea unor modele statistico - matematice (deduse din observații și

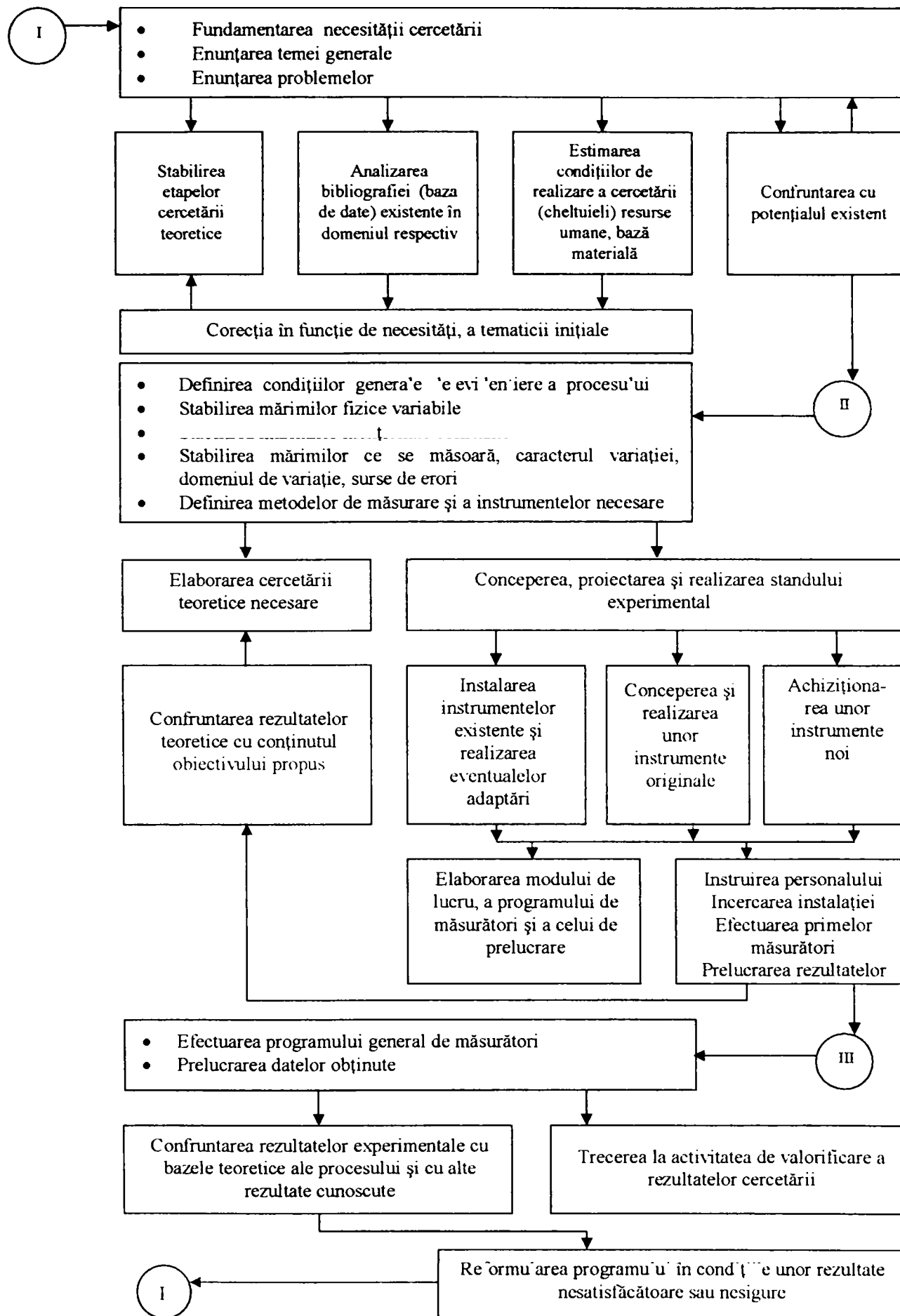


Fig. 4.1. Model sistemic al programului de planificare și organizare a cercetării științifice

măsurători asupra procesului studiat). Astfel, pe măsura creșterii complexității sistemelor studiate, crește și ponderea cercetării experimentale în ansamblul cercetării științifice.

## 4.2. Metode de studiu a câmpului termic în sistemul termodinamic primar

Fenomenele fundamentale la prelucrarea prin eroziune complexă se desfășoară în sistemul termodinamic primar, ceea ce impune studiul câmpului termic pentru componente ale acestui sistem. Studiul este un proces laborios de cercetare științifică care utilizează ipoteze emise în cercetări anterioare.

În realizarea sa, ținând seama de programul de planificare și organizare a cercetării științifice, o primă etapă o constituie identificarea proceselor ce au loc (cap.1, cap.3), cu evidențierea tuturor elementelor ce participă, direct sau indirect la proces (parametri de stare, parametri de proces, caracteristici tehnologice etc.), iar în figura 4.2 este reprezentată schema de identificare a proceselor la prelucrarea prin eroziune complexă.

Normele de bază ale cercetării științifice ne oferă așadar posibilitatea realizării unui asemenea studiu prin mai multe metode, având fiecare un algoritm cadru, dar prezentând particularizări în funcție de structura lor. Aceste metode pot fi: analitice, experimentale sau mixte.

Cum transmiterea căldurii în sistemul termodinamic primar se realizează în regim nestaționar, condițiile efective în care se desfășoară transferul termic nu corespund cu cele în care se stabilesc teoretic relațiile [4, 7, 8, 24, 71, 72, 84]. În timpul transferului termic se modifică continuu temperatura componentelor, în mod special a obiectului de prelucrat, deci se modifică și proprietățile termo-fizice ale corpului și ale straturilor limită, mărimi care schimbă în primul rând coeficientul de transfer termic, precum și celelalte mărimi care intervin în ecuațiile transferului de căldură.

Proprietățile termice sunt prin natura lor proprietăți macroscopice, întrucât ele sunt descrise prin mărimi termodinamice. Aceste mărimi pot fi calculate numai dacă se cunosc funcțiile de distribuție statistică ale stărilor microscopice ale sistemului în condiții de echilibru termodinamic.

Asemenea situații complexe nu se pot rezolva pe cale analitică, ceea ce reclamă utilizarea unor metode numerice și grafice. Cu abateri destul de mici față de realitate se pot aplica metode grafo - analitice bazate pe metoda ecuației cu diferențe și nu pe metoda ecuației diferențiale.

### a) Metode analitice

Metodele analitice de studiu a câmpului termic înglobează în structura lor relațiile matematice care exprimă legile electrochimiei, ale electricității, termodinamicii și mecanicii, ce guvernează declanșarea, dezvoltarea și încetarea proceselor erozive.

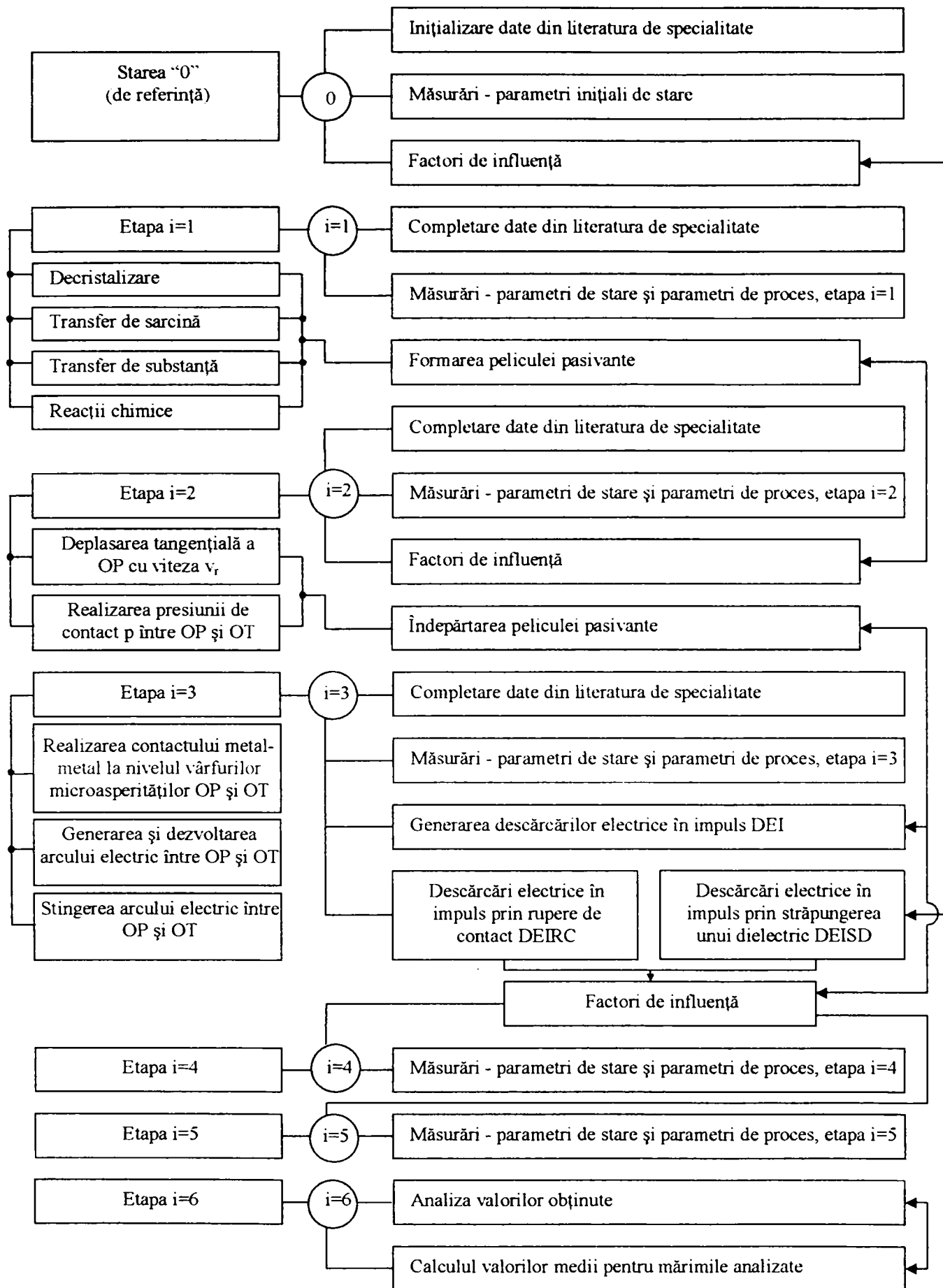


Fig.4.2. Schema bloc de identificare a proceselor la prelucrarea prin eroziune complexă



Astfel, modelarea câmpului termic pe cale analitică presupune:

- stabilirea vectorului densitate de flux termic;
- analiza și aplicarea legilor transferului de căldură (conductivitate termică, convecție termică, radiație termică);
- stabilirea ecuațiilor modelului:
  - ecuația conservării energiei – primul principiu al termodinamicii;
  - ecuația conservării masei (ecuația continuității) – al doilea principiu al termodinamicii;
  - ecuația de mișcare.
- stabilirea condițiilor inițiale și de frontieră;
- stabilirea ipotezelor simplificatoare pentru sistemul studiat;
- definirea ecuațiilor modelului pentru sistemul studiat.

În baza acestora, în capitolul 3 s-a realizat, prin metode analitice, o primă etapă a studiului câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă, stabilindu-se teoretic componentele energetice.

Literatura de specialitate[19, 85, 87, 91, 92, 100, 111, 120] furnizează informații privind astfel de studii în domeniu, având ca obiectiv anumite segmente restrânse ale sistemului termodinamic primar.

#### *b) Metode experimentale*

Utilizând baza tehnico-materială existentă în laboratorul de „Prelucrări prin eroziune complexă” al Catedrei de Tehnologie Mecanică din Facultatea de Mecanică din Timișoara, se determină prin măsurări factori de influență, parametri de stare și de proces, precum și caracteristici tehnologice ce definesc procesul eroziv și care au relevanță în determinarea influenței câmpului termic.

Se cuvine subliniat faptul că laboratoarele Catedrei de Tehnologie Mecanică constituie locul de pionierat în domeniu, iar rezultatele obținute de-a lungul anilor de către specialiștii catedrei constituie bazele cercetării la prelucrarea prin eroziune complexă, fundamentarea ipotezelor teoretice prin verificarea lor experimentală, dobândirea de către catedră a statutului de colectiv de cercetare etalon.

Împletind metodele analitice de cercetare cu cele experimentale se poate elabora o strategie de cercetare a câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă, o strategie clasică, convențională (fig. 4.3), care, prin rezultatele furnizate, își poate confirma sau infirma valabilitatea.

Etapă de bază a unei cercetări experimentale o constituie realizarea experimentărilor, în conformitate cu planificările realizate. Este necesară stabilirea secvențelor regimurilor



experimentale, ținând seama de faptul că în domeniul tehnic cercetările sunt caracterizate, de cele mai multe ori prin ireversibilitate, evoluând într-un singur sens.

Din considerente de precizie, durată de achiziție și prelucrare a datelor, precum și de cost al cercetării, se alege volumul măsurătorilor ținând seama de faptul că la un număr insuficient de date scade precizia și rezultatul final al cercetării prezintă erori, iar un număr mai mare de măsurări încarcă inutil programul de cercetare. Concluzii incomplete sau eronate pot fi obținute și în cazul repetării excesive a unor măsurători care maschează tendința de variație a parametrilor, ca urmare a dispersiei inevitabile a datelor.

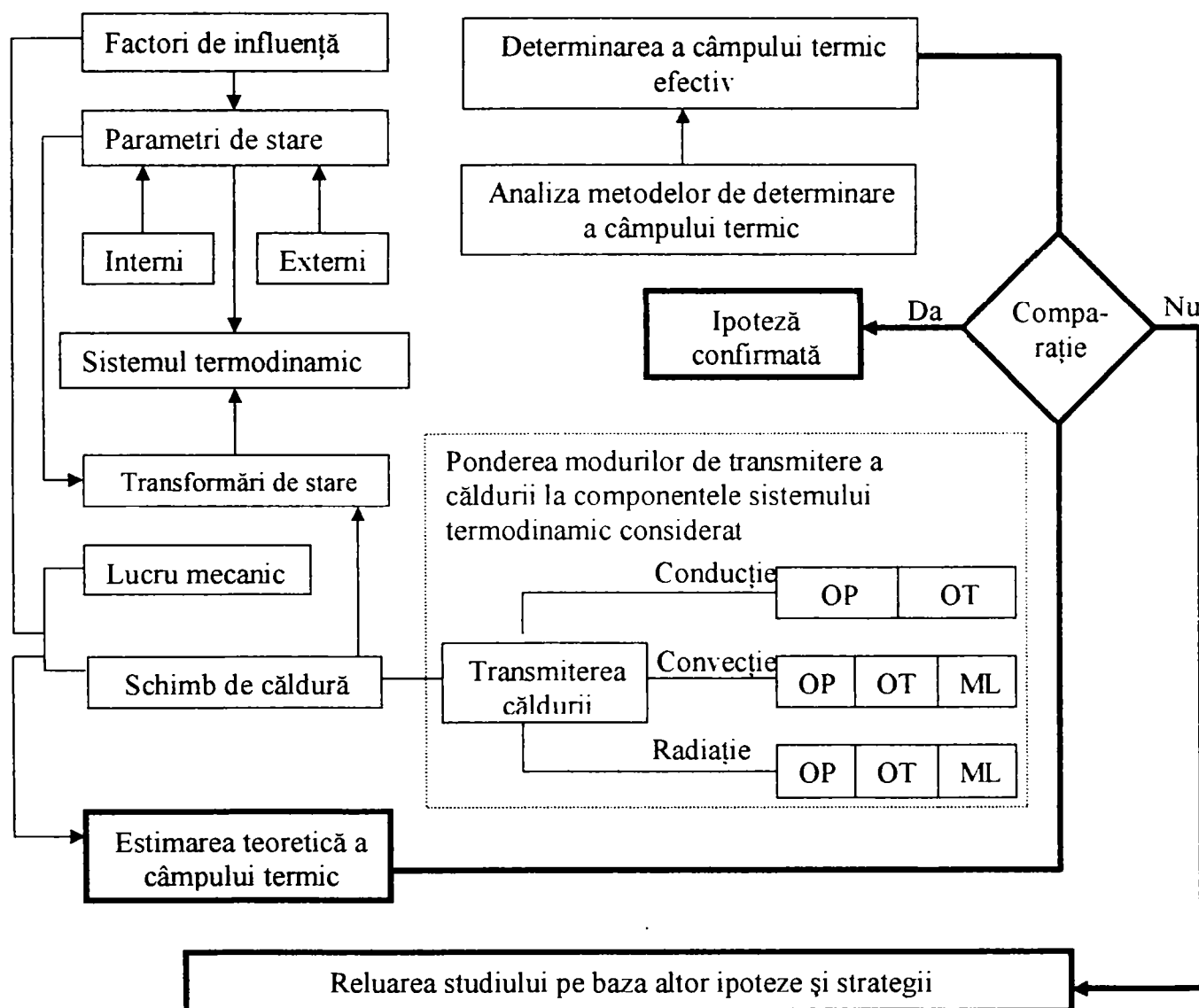


Fig. 4.3. Strategia de cercetare și calcul al câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă

După încheierea experimentelor se trece la prelucrarea acestora. Într-o primă etapă se verifică oportunitatea eliminării unor date din șirul valorilor obținute, după care se deduc relațiile

matematice ale modelului. Pentru verificarea și validarea modelului matematic obținut se utilizează teste specifice diverselor tipuri de experimentări.

c) *Metode numerice*

Transferul de căldură este un fenomen guvernat de ecuații diferențiale neliniare, cu derivate parțiale care nu pot fi integrate pe cale analitică și de aceea, pentru a putea obține soluția lor, în condițiile inițiale de frontieră precizate, este necesar să se apeleze la metode numerice.

La determinarea câmpului termic, care este soluția unei ecuații cu derivate parțiale, în condiții inițiale și de frontieră bine precizate, se pot utiliza două modalități:

- aproximarea operatorilor diferențiali ai ecuației cu derivate parțiale și ai celor ce precizează condițiile inițiale și de frontieră prin operatori simplificați, urmată de rezolvarea sistemului algebric obținut, etape ce conduc la metoda diferențelor finite;
- utilizând operatorii diferențiali stabiliți neschimbați, se caută un algoritm care să ofere cea mai bună aproximare posibilă, ceea ce determină utilizarea metodei elementului finit.

*Metoda diferențelor finite* se bazează pe aproximarea ecuațiilor diferențiale cu derivate parțiale prin ecuații cu diferențe finite care sunt de fapt ecuații algebrice. Comparativ cu metodele analitice care permit determinarea soluției de câmp în fiecare punct, metoda diferențelor finite dă valorile câmpului într-un număr finit de puncte – noduri, situate la intersecția curbelor unei rețele de discretizare a domeniului de câmp.

Considerăm o funcție  $f(x)$ , în cazul nostru o funcție de câmp, definită pe intervalul  $[a, b]$  care se consideră discretizată cu pas constant  $h = (b-a)/n$  în „ $n+1$ ” noduri și fie  $f_0, f_1, \dots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \dots, f_n$ , valorile funcției în aceste noduri (Fig.4.4).

În acest mod, soluția unei ecuații diferențiale în care funcția necunoscută este  $f(x)$ , va fi înlocuită prin tabloul de valori  $[f_i]$  ale acesteia în nodurile rețelei de discretizare.

Modelarea câmpului termic cu *metoda elementului finit*, utilizând calculatorul electronic, se bazează pe conceptul construirii obiectelor complicate din elemente mai simple, sau în cazul nostru, divizarea obiectelor complicate în obiecte simple pentru care se pot aplica scheme de calcul cunoscute. Prin urmare, ideea de bază este de a găsi soluția unei probleme complicate înlocuind-o cu una simplă. Aceasta se realizează prin procedeul aproximării prin discretizare în spațiu ce constă din înlocuirea variațiilor în spațiu ale fiecărei mărimi ce intervine în modelul matematic studiat, variații în general continue, cu variații discrete, formate din mulțimea valorilor mărimii respective, la anumite intervale de timp, în anumite entități geometrice ale domeniului considerat.

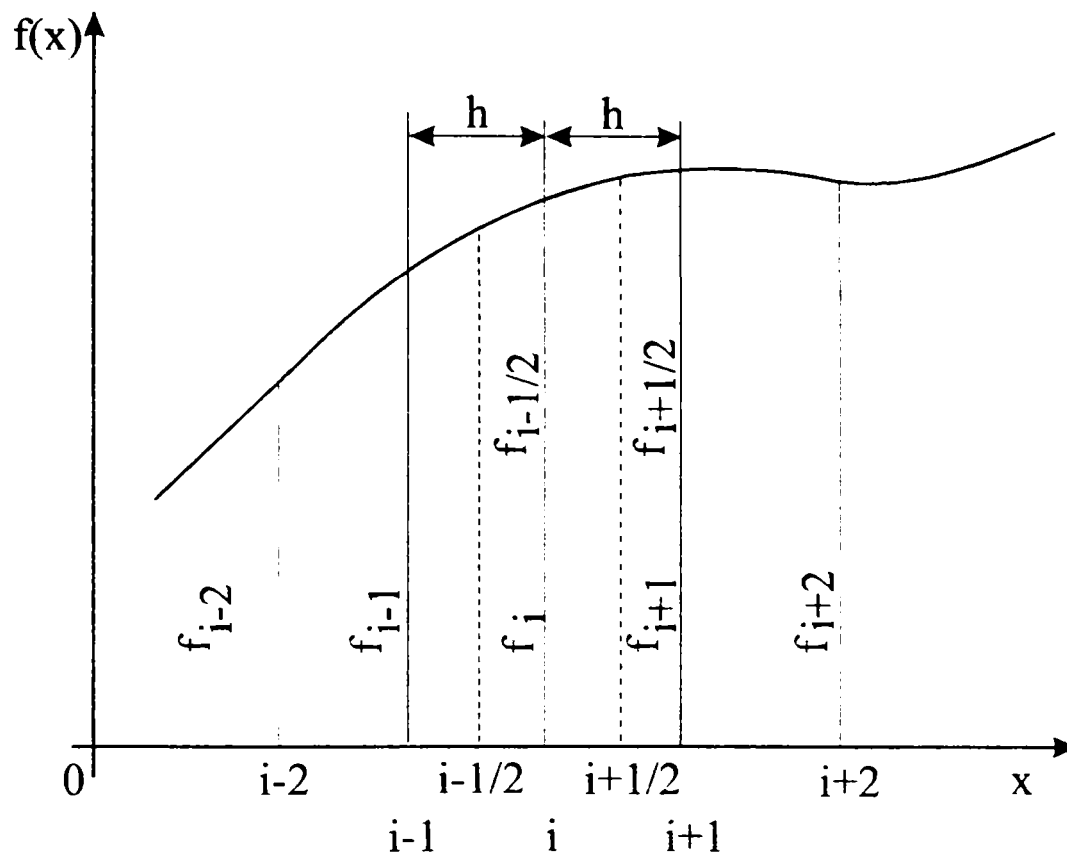


Fig. 4.4. Împărțirea domeniului analizat în domenii finite și dependența funcțională între mărimi

*Discretizarea în spațiu* presupune divizarea domeniului considerat în mai multe subdomenii numite elemente finite, fiecare element finit având aceleași dimensiuni ca și domeniul respectiv. Aproximarea locală pe elemente finite a funcției se realizează prin valorile funcției în câteva puncte finite alese în prealabil din aceste subdomenii, puncte numite noduri. Majoritatea elementelor finite se caracterizează exclusiv prin nodurile lor iar elementele finite se numesc nodale. Elementele finite pot fi unidimensionale, bidimensionale sau tridimensionale, în funcție de geometria structurii pe care o modelează.

Nodurile sunt plasate de regulă pe conturul subdomeniului unde elementele adiacente sunt conectate între ele. Variația reală a variabilei de câmp în interiorul continuului nu este cunoscută și se admite că poate fi aproximată printr-o funcție simplă. Funcțiile de aproximare sunt definite în funcție de valorile variabilelor de câmp în noduri.

Metoda elementului finit este o metodă de determinare aproximativă datorită faptului că geometria reală este întotdeauna înlocuită cu o rețea de elemente finite care urmărește forma dar nu o poate reda cu exactitate decât pentru geometrii particulare datorită numărului finit de elemente, iar

mărimile necunoscute sunt calculate numai în nodurile structurii. Precizia modelării este cu atât mai mare cu cât numărul elementelor finite este mai mare.

Utilizarea metodei elementului finit presupune existența unui model matematic complet al procesului studiat care, în general, conține integrale pe domeniul considerat și pe frontiera acestuia și unele expresii având forma definită pentru modelul diferențial.

Folosind în continuare proprietățile integralelor se obțin ecuațiile modelului pentru fiecare element finit, de aceeași formă cu cea a modelului matematic integral, valabilă pe întregul domeniu considerat. Astfel, în modelul fiecărui element finit, valoarea oricărei mărimi, definită într-un punct oarecare al elementului, se înlocuiește cu expresia determinată. Orice mărime de stare are o singură valoare spațială în fiecare nod al elementului, rezultând că este o constantă pentru operațiile de derivare în raport cu spațiul, astfel încât, în aceste operații, vor interveni numai funcțiile de interpolare. Aceasta permite ca valorile mărimilor din nodurile elementului să poată fi scrise în fața integralelor, iar integralele, fiind definite, vor conduce la câte o valoare numerică, obținându-se modelul numeric pentru elementul finit respectiv.

Pentru o aceeași densitate a rețelei de divizare, discretizarea în spațiu se face cu o eroare mai mică, motiv pentru care analiza influenței câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă se recomandă a se realiza utilizând metoda elementului finit. Pornind de la schema bloc de identificare a proceselor se poate concepe itinerarul de modelare a fenomenelor, astfel încât să se poată analiza influența câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă.

## 5. ASPECTE ALE TRANSFERULUI DE CĂLDURĂ LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ

### 5.1. Componentele energiei introduse în spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune complexă

Pentru realizarea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune complexă, introducerea energiei în sistemul termodinamic primar se realizează sub mai multe forme, fiecare influențând într-o anumită pondere procesul tehnologic:

- *energia electrică* – componenta fundamentală a energiei introduse în sistemul termodinamic;
- *energia chimică* – componenta energiei introduse în sistemul termodinamic prin intermediul electrolitului;
- *energia mecanică* – componenta energiei introduse în sistemul termodinamic prin sistemele mecanice de rotire și avans.

În figura 5.1 sunt reprezentate schematizat componentele energiei introduse în sistemul termodinamic cu evidențierea principalelor efecte ce le au în sistem.

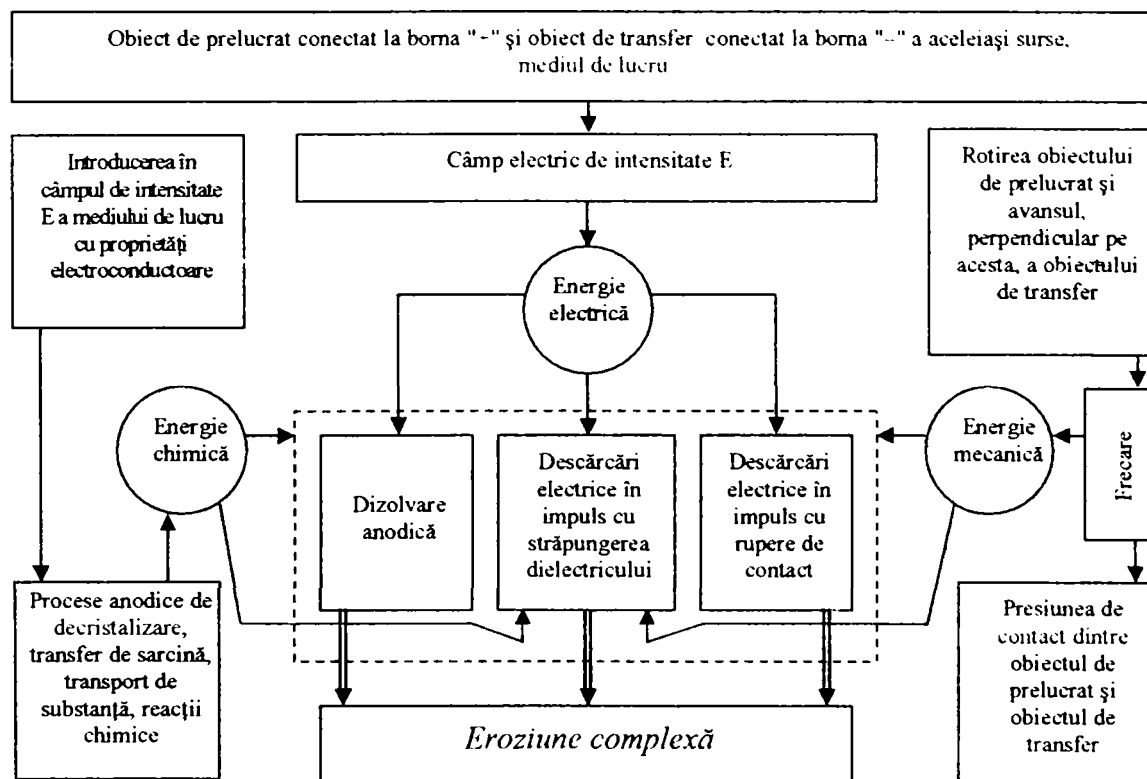


Fig. 5.1. Componentele energiei introduse în sistemul termodinamic

Procesul de prelucrare prin eroziune complexă poate fi controlat prin acționarea, în sensul dorit, printre altele, și asupra factorilor de influență de natură electrică, mecanică și chimică care se regăsesc în figura 5.1 ca și componente ale energiei introduse în sistem.

Cum însă cea mai mare cantitate de energie, în cadrul prelucrării prin eroziune complexă este reprezentată de energia termică ce determină topirile și evaporările locale, în figura 5.2 se reprezintă schematizat, prin ierarhizare, gradul în care factorii de influență intervin asupra acestei forme de energie, subliniindu-se în acest mod complexitatea proceselor.

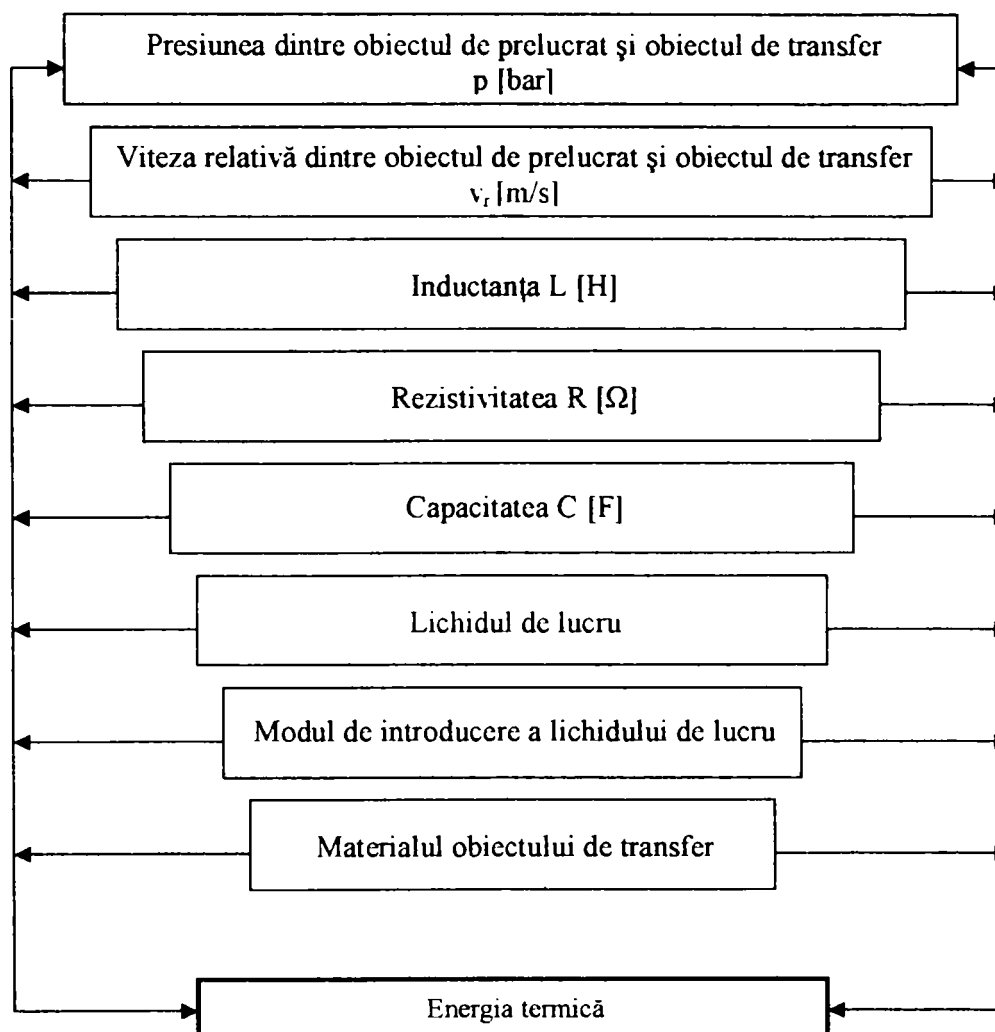


Fig. 5.2. Ierarhizarea principalilor factori de influență

În capitolul 3, prin studiul schimbului de căldură și a energiei dezvoltate în sistemul termodinamic primar, au fost evidențiate componentele energiei introduse și modul în care acestea sunt utilizate ca și componente utile, recirculate sau pierderi. Completându-se acel studiu, se realizează în prezentul capitol explicitarea energiilor introduse în sistem prin analiza modului de desfășurare a procesului de prelucrare prin eroziune complexă.

## 5.2. Analiza energiilor introduse în sistemul termodinamic primar

Desfășurarea proceselor elementare în spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune complexă presupune conectarea obiectului de prelucrat și a celui de transfer la bornele sursei de alimentare cu energie electrică. Aceasta este introdusă în sistemul termodinamic primar și acționează în cantumuri diferențiate în principalele procese ce au loc:

- energia consumată în procesele anodice de decristalizare, transfer de sarcină, transport de substanță, reacții chimice etc., în urma cărora apare pe suprafața anodului pelicula pasivantă;
- energia consumată pentru descărcările electrice în impuls prin rupere de contact;
- energia consumată pentru descărcările electrice în impuls prin străpungerea dielectricului.

Când puterea specifică introdusă în spațiul de lucru este mică, prelevarea de material are loc preponderent ca urmare a dizolvării anodice. În acest caz, productivitatea prelucrării mecanice este mică, dar se obține precizie de prelucrare ridicată și rugozitate a suprafețelor mică.

Când puterea specifică introdusă în spațiul de lucru crește, prelevarea de material are loc preponderent ca urmare a efectului termic al descărcărilor electrice în impuls. În această situație, datorită concentrărilor locale de energie, se pot atinge, în canalul descărcării, temperaturi cu valori de ordinul  $10^4$ - $10^5$  K și, pe lângă topirea și vaporizarea explozivă locală a materialului din stratul de suprafață a obiectului de prelucrat, are loc și descompunerea electrolitului. Produsele acestor fenomene fizice și chimice determină formarea peliculei pasivante și implicit proprietățile sale.

Anodul este reactivat prin îndepărtarea forțată, mecanică, a peliculei pasivante. Este posibilă astfel întreținerea unor descărcări simultane sau parțial suprapuse și, în consecință, un efect termic pronunțat ca urmare a concentrării curentului pe suprafețe foarte mici. Cea mai mare parte a acestei energii este transmisă anodului care astfel este supus unei eroziuni mai intense, obținând efectul dorit. Durata unei descărcări este așadar de ordinul  $10^{-3}$ - $10^{-5}$  s și se ating densități de curent de ordinul  $10^3$ - $10^5$  A/cm<sup>2</sup>.

Având la bază legile electrochimiei [116], *dizolvarea anodică* a unui metal constă într-un număr oarecare de etape parțiale, determinând, în cazul prelucrării prin eroziune complexă, pasivitatea electrochimică. Instalarea stării pasive depinde de mediul de lucru, de condițiile de lucru, de starea inițială a suprafeței și proprietățile stratului acoperitor format.

Pasivitatea care apare în urma polarizării anodice a metalului prin impunerea unui curent exterior se numește pasivitate electrochimică. Potrivit ipotezei lui Faraday, pasivitatea este provocată de un film subțire de oxid metalic existent pe suprafața electrodului. Filmul împiedică dizolvarea mai departe a anodului, fie printr-un efect ohmic, dacă filmul este compact, fie printr-un suprapotențial de transport, dacă filmul este poros.



Ușurința instaurării stării pasive, exprimată în cantitatea de electricitate necesară pentru ca metalul anodic să devină pasiv, depinde de gradul de solubilitate al produsului anodic inițial.

Cantitatea teoretică de substanță  $m_t$  care se depune la electrod, respectiv cantitatea de metal adus în stare ionică ca urmare a acțiunii electrochimice a curentului, este proporțională cu intensitatea  $I$  [A] a curentului care trece prin soluție și cu durata sa de trecere  $t$  [s], după relația:

$$m_t = k \cdot I \cdot t \cdot 10^{-3} \text{ [mg]} \quad (5.1)$$

unde:  $I$  [A] – intensitatea curentului electric care trece prin soluție;

$t$  [s] – durata de trecere a curentului electric;

$k$  – echivalentul electrochimic al substanței și reprezintă cantitatea de metal dizolvat la anod la trecerea unui curent de 1 A timp de 1 s, adică  $1C$  ( $1C = 1As$ ).

$$k = \frac{A}{Z \cdot F} \text{ [mg/As]} \quad (5.2)$$

unde:  $A$  [mg] – greutatea atomică a elementului supus dizolvării;

$Z$  – valența elementului;

$F$  – constanta lui Faraday ( $F = 96500 \text{ C} = 96500 \text{ As}$ ).

Durata procesului de pasivizare a obiectului de prelucrat este foarte mică ( $0,06 \div 0,03 \text{ s}$ ) la parametrii electrici utilizați curent în procesele de prelucrare prin eroziune complexă [53, 75, 85, 86, 87, 92, 98, 111, 116]. Timpul este suficient pentru ca obiectul de transfer și obiectul de prelucrat, datorită avansului de lucru  $s$ , să vină în contact la nivelul microasperităților.

Pentru reactivarea procesului de prelevare este necesară utilizarea *energiei mecanice* la îndepărtarea peliculei pasivante rezultate în urma procesului de dizolvare anodică și se trece astfel la o nouă etapă în procesul de prelucrare prin eroziune complexă.

Datorită deplasării relative dintre obiectul de transfer și obiectul de prelucrat cu viteza  $v_r$  și apariției suplimentare a unei presiuni de contact  $p$  între cei doi electrozi, apare o frecare în urma căreia, la nivelul vârfurilor microasperităților, pelicula pasivantă este îndepărtată. Îndepărtarea peliculei pasivante se realizează așadar prin depasivarea forțată mecanică, abrazivă și se creează astfel condițiile favorabile pregătirii apariției descărcărilor electrice în impuls.

Procesul de dizolvare anodică apare cu pondere masivă doar în faza inițială a prelucrării, iar după apariția descărcărilor electrice în impuls apare într-o pondere extrem de mică sau nu mai apare deloc.

Descărcările electrice în impuls, prezente în spațiul de lucru între obiectul de transfer și obiectul de prelucrat, în condițiile existenței peliculei pasivante, a dizolvării anodice determinate de filmul de electrolit, precum și a unor cantități mai mari sau mai mici de produse ale eroziunii aflate în suspensie în mediul de lucru, se pot genera fie prin ruperea contactelor metalice parcurse de curent DEIRC, fie prin străpungerea dielectricului DEISD [50, 52, 75, 85, 87, 91, 92, 97, 111].



Prin efectul mecanic realizat de către obiectul de transfer asupra prelucrării, pelicula pasivantă poate fi îndepărtată la nivelul vârfurilor microasperităților obiectului de prelucrat. În aceste condiții, între cele două microasperități, una pe obiectul de transfer și una pe obiectul de prelucrat, se stabilește un contact metalic de scurtă durată, prin care se realizează trecerea curentului electric elementar. La întreruperea contactului metalic va apare o descărcare electrică în impuls prin rupere de contact metalic.

Când pelicula pasivantă nu este îndepărtată sau este îndepărtată incomplet de pe vârful microasperității, pot apare descărcări electrice în impuls prin străpungerea dielectricului. Aceasta se datorează fie diminuării rigidității dielectrice a peliculei pasivante, fie micșorării grosimii sale, fie conținutului ridicat de impurități electroconductoare din pelicula pasivantă.

În condițiile prezenței unei temperaturi foarte ridicate la nivelul suprafețelor de contact ale celor două microasperități, temperatură ce favorizează emisia termoelectronică, se asigură amorsarea și dezvoltarea descărcărilor electrice în impuls prin ruperea contactului electric.

Descărcarea electrică în impuls prin rupere de contact se constituie prin apariția, la început, a unui microarc ce se dezvoltă rapid, în condițiile unei ionizări puternice. Durata de întreținere a descărcării electrice în impuls prin rupere de contact este foarte mică, impunând fenomenului caracterul de impuls. Ea este determinată de condițiile locale, de mărimea parametrilor electrici (tensiune  $U$ , intensitate  $I$ , rezistență  $R$ , inductanță  $L$ , capacitate  $C$ ), precum și de viteza relativă  $v_r$  dintre cei doi electrozi.

Descărcările electrice în impuls prin străpungerea dielectricului sunt caracterizate prin transformarea foarte concentrată a energiei electrice în energie termică și mecanică, densitatea volumică a energiei atingând valori până la  $30000 \text{ J/mm}^3$ , iar cea de putere de  $300 \text{ kW/mm}^3$ . Ele sunt favorizate de grosimea mai mică a peliculei pasivante, de conținutul ridicat de impurități electroconductoare în pelicula pasivantă sau în mediul de lucru, temperatura locală etc.

Distanța dintre cele două microasperități, una aparținând obiectului de transfer și cealaltă obiectului de prelucrat crește foarte repede ducând la scăderea sub o anumită limită a intensității câmpului electric din coloana arcului precum și la scăderea ionizării electrice și termice.

În acest mod descărcarea electrică în impuls prin ruperea contactului electric se întrerupe.

Ponderea unuia din cele două tipuri de descărcări nu a fost stabilită nici teoretic, nici pe căi experimentale, deoarece ele sunt consecința unui proces aleator ce se dezvoltă concomitent în mai multe puncte pe suprafața de contact a celor două obiecte, acolo unde condițiile locale fizico-chimice sunt propice desfășurării lor. Pentru fiecare punct în parte fenomenele se dezvoltă similar, intensitatea curentului în fiecare contact fiind în funcție de intensitatea globală a curentului de lucru și de condițiile locale specifice fiecărui microcontact.

### 5.3. Stabilirea componentei fundamentale a energiei introduse în sistemul termodinamic primar

Deoarece în timpul procesului de eroziune complexă la suprafața obiectului de prelucrat iau naștere temperaturi înalte care conduc la procese de încălzire, topire și vaporizare a microvolumelor de material, se impune analiza procesului de prelucrare prin prisma proceselor termice.

Sursa acestora [54, 75, 92, 95, 111, 120, 121] o constituie descărcările electrice în impuls care reprezintă o transformare de înaltă concentrare a energiei electrice preponderent în energie termică. Cea mai mare parte a acesteia se consumă pentru distrugerea completă și localizată a forțelor de legătură dintre atomii și moleculele obiectului de prelucrat, nivelul ei fiind plasat, în general, peste cel al energiei de vaporizare a oricărui metal.

Descărcarea electrică prin impuls produce pe suprafața anodului o sursă de căldură care este punctiformă și instantanee. Dar descărcarea electrică în impuls presupune un consum de energie electrică, prin urmare se impune determinarea energiei electrice introduse în sistemul termodinamic primar care, printr-o transformare ireversibilă, determină o creștere a energiei interne într-o zonă a sistemului. Această zonă constituie un izvor de căldură.

Pentru caracterizarea locală a izvorului de căldură, a sursei termice, este necesar să se definească căldura dezvoltată în unitatea de timp într-un element de volum din jurul aceluși punct. Aceasta se numește [120, 121] densitate de volum a vitezei de generare a căldurii sau densitate de volum a fluxului termic dezvoltat, ceea ce reprezintă de fapt puterea calorică specifică.

Notând cu  $q_d$  puterea calorică specifică dintr-un moment oarecare  $\tau$ , într-un punct oarecare  $M$ , atunci căldura dezvoltată într-un timp infinit mic  $d\tau$ , într-un element de volum  $dV$  din jurul punctului  $M$ , este un infinit mic, de ordinul doi, notat  $d^2Q_E$  ce se exprimă cu relația:

$$d^2Q_E = q_E \cdot dV \cdot d\tau \quad (5.3)$$

și, având în vedere legea transformării energiei electromagnetice în procesul conducției electrice, puterea calorică se obține cu relația:

$$\dot{q}_E = \vec{j} \cdot \vec{E} \quad (5.4)$$

unde:  $\vec{j}$  [ $A/m^2$ ] și  $\vec{E}$  [ $A$ ] sunt densitatea curentului electric, respectiv intensitatea câmpului electric din punctul considerat.

Considerând coloana descărcării un mediu omogen și izotrop, pe baza formei locale a legii conducției electrice se obține:

$$q_E = \sigma \cdot E^2 \quad (5.5)$$

respectiv:

$$q_E = \rho \cdot J^2 \quad (5.6)$$

unde:  $\sigma$  [S/m] – conductivitatea electrică a coloanei descărcării;

$\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] – rezistivitatea electrică a coloanei descărcării.

Determinarea căldurii dezvoltate într-un timp infinit mic în jurul punctului oarecare M nu oferă imaginea de ansamblu a căldurii dezvoltate pe întreaga suprafață de prelucrat. De aceea, în baza relațiilor de mai sus și a studiului realizat în capitolul 3, se va determina câmpul termic la prelucrarea prin eroziune complexă.

Deoarece între componentele sistemului termodinamic primar precum și între componentele microsystemelor acestuia există diferențe de temperatură, apare un schimb de energie sub formă de căldură. Căldura transferată în unitatea de timp reprezintă fluxul termic transmis prin acea suprafață iar studiul transferului de căldură urmărește determinarea câmpului vectorial  $\dot{q} = q(\vec{r}, \vec{r})$  prin utilizarea legilor specifice fiecărui mod de transmitere a căldurii.

## 5.4. Transferul de căldură în microsystemul obiect de prelucrat

### 5.4.1. Considerații generale

Aspectele teoretice ale transmiterii căldurii la prelucrarea prin eroziune complexă enunțate în capitolul 3.4 precum și studiul schimburilor energetice ce au loc în timpul acestor prelucrări, constituie elementele de bază în determinarea influenței câmpului termic.

Datorită parametrilor de stare proprii fiecărui microsystem al sistemului termodinamic primar și parametrilor de proces, legile după care se realizează transferul de căldură se manifestă diferit în fiecare microsystem. Estimativ, ponderea acestora este reprezentată în figura 5.3, având în vedere sintezele realizate în figurile 3.13 (microsystemul obiect de prelucrat MSOP), 3.15 (microsystemul obiect de transfer MSOT) și 3.17 (microsystemul mediu de lucru MSML).

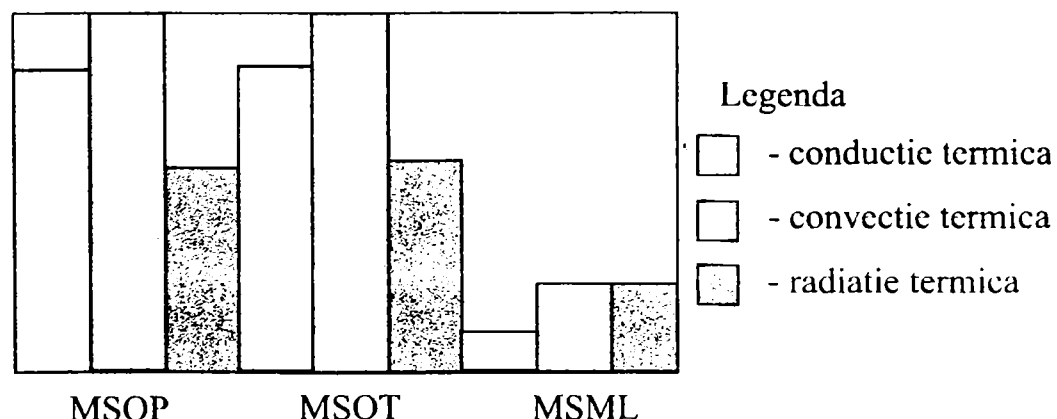


Fig.5.3. Ponderea modului de transmitere a căldurii în microsystemele sistemului termodinamic primar

Având în vedere că obiectivul prelucrării prin eroziune complexă este îndepărtarea de material din obiectul de prelucrat, studiul influenței câmpului termic este necesar să se realizeze pornind de la microsistemul obiect de prelucrat.

## **5.4.2. Evoluția câmpului termic în diverse structuri ale microsistemului obiect de prelucrat**

### **5.4.2.1. Structuri ale microsistemului obiect de prelucrat**

Cerințele industriei au reclamat găsirea unor metode tehnologice și soluții constructive care să răspundă cât mai fidel nevoilor.

Sintezele realizate în tabelele 1.3 și 1.4 sunt relevante în acest sens și prin urmare, evoluția câmpului termic poate fi analizată în următoarele variante:

- prelucrare cu electrod bandă;
- prelucrare profilată după contur cu electrod filiform;
- prelucrare cu obiect de transfer disc;
- prelucrare cu obiect de transfer multiplu.

Procesele tehnologice de prelucrare, utilizând una din soluțiile constructive ale obiectului de transfer, pot fi:

- debitare piese cilindrice;
- debitare țevi de diametru mare;
- realizare de fante înguste în piese tubulare;
- realizare de fante înguste în piese plane;
- rectificarea sculelor așchietoare;
- rectificarea suprafețelor plane;
- rectificarea suprafețelor profilate;
- prelucrarea suprafețelor profilate la corpuri de revoluție etc.

În acest studiu ne propunem analiza unor aspecte ale câmpului termic la prelucrarea cu obiect de transfer disc, pentru diferite procese tehnologice.

### **5.4.2.2. Debitare - obiect de prelucrat cilindru**

Considerăm obiectul de transfer un disc cilindric având diametrul  $D_{OT}$  și grosimea  $g_{OT}$  iar obiectul prelucrat un corp cilindric de diametru  $D_{OP}$  ( $D_{OP} = 2r_{OP}$ ), cu lungime finită  $L$  (fig. 5.4). În funcție de diametrul acestuia și considerând un proces tehnologic de debitare, prelucrarea se poate face în una din următoarele variante:

- obiect de prelucrat fix – obiect de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare;
- obiect de prelucrat în mișcare de rotație – obiect de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare;
- obiect de prelucrat – obiect de transfer cu avans combinat.

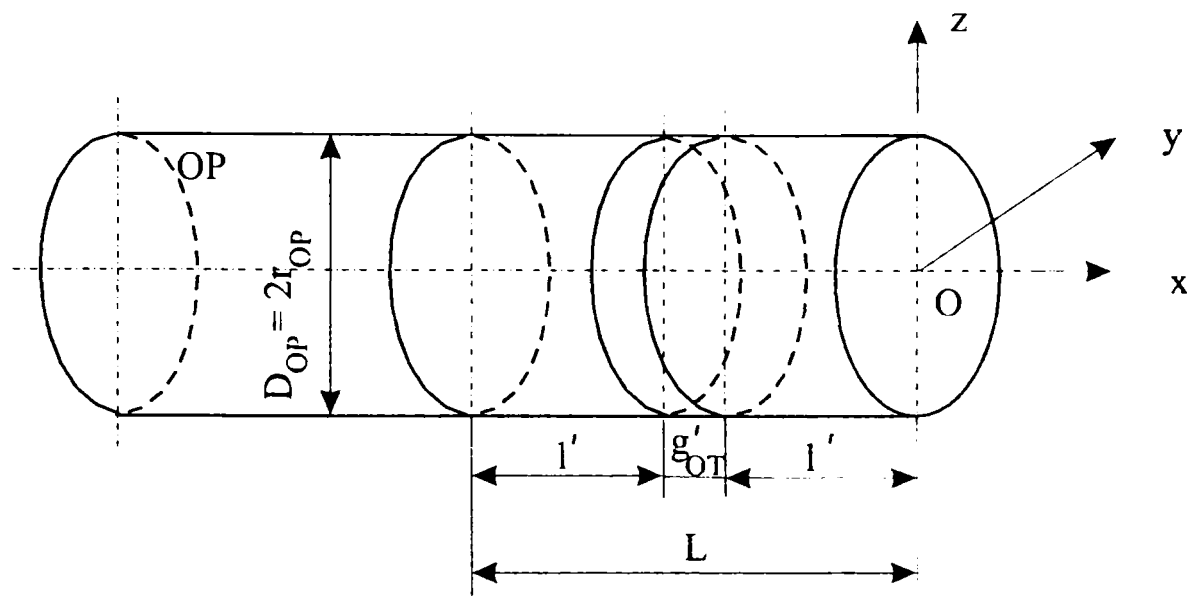


Fig. 5.4. Reprezentarea schematizată a obiectului de prelucrat – corp cilindric cu lungime finită

Zona studiată, considerată dimensiunea finită  $2l'$  este alcătuită, conform relației 5.7 din porțiunea obiectului de prelucrat influențată termic, situată de o parte și de cealaltă a porțiunii de prelucrare ( $l'$ ) precum și din elementul finit corespunzător acesteia dar al cărui volum se micșorează, concomitent cu prelevarea de material ( $g'_{OT}$ ):

$$L = 2l' + g'_{OT} \quad (5.7)$$

Grosimea  $g'_{OT}$  este compusă din grosimea obiectului de transfer ( $g_{OT}$ ) și din înălțimea  $h'$  a materialului îndepărtat de pe obiectul de prelucrat ca urmare a acțiunii suprafețelor laterale ale obiectului de transfer:

$$g'_{OT} = g_{OT} + 2h' \quad (5.8)$$

Ea este echivalentă cu înălțimea  $g_{OP}$  a porțiunii de material îndepărtate din obiectul de prelucrat.

Pornind de la aceste considerente de ordin general, se analizează etapele propagării câmpului termic în obiectul de prelucrat, în etapele enunțate.

a) *Obiect de prelucrat (cilindru) fix - obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare*

Obiectul de transfer, în mișcarea de avans de prelucrare, perpendicular pe axa longitudinală a obiectului de prelucrat, vine în contact cu suprafața exterioară a acestuia în punctul M, în momentul inițial al prelucrării  $\tau_0$ . Avansul  $s_t$  se realizează după diametrul obiectului de prelucrat ( $D_{OP}$ ) astfel încât punctul M de contact are o traiectorie liniară de-a lungul acestui diametru, până la sfârșitul cursei de avans, în momentul final al prelucrării (debitare).

Punctul M aparține suprafeței active de prelucrare  $S_a$ , dar pentru simplificare, în această etapă a studiului de caz nu se consideră suprafața ci punctul M.

Concomitent cu deplasarea acestuia se propagă și câmpul termic, atât în direcție radială, cât și după axa  $Ox$ , respectiv  $Oy$ , conform reprezentării din tabelul 5.1, unde  $q$  reprezintă densitatea de flux termic,  $T$  este câmpul termic scalar,  $\tau$  timpul și  $t$  temperatura.

Dacă analizăm reprezentările din tabelul 5.1, putem defini în acest caz câmpul termic ca fiind de tip *picătură*.

Prelucrarea prin eroziune complexă cu obiectul de prelucrat fix și obiectul de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare se folosește la semifabricatele de diametre mici, la care este respectată condiția dată de relația 5.9:

$$D_{OP} < r'_{OT} \quad (5.9)$$

unde  $r'_{OT}$  reprezintă zona activă de prelucrare exprimată prin diferența dintre raza propriu-zisă a obiectului de transfer și raza flanșei de prindere a acestuia.

b) *Obiect de prelucrat (cilindru) în mișcare de rotație -- obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare*

Obiectul de prelucrat de formă cilindrică se rotește cu turația  $n$ , din momentul inițial al prelucrării  $\tau_0$  și până în momentul final  $\tau_f$  când s-a realizat debitarea. În intervalul de timp  $\Delta\tau$  ( $\Delta\tau = \tau_f - \tau_0$ ) are loc procesul de prelucrare, perpendicular pe axa cilindrului, obiectul de transfer având mișcarea de avans de la diametrul exterior înspre axă.

Prin urmare, în momentul inițial  $\tau_0$  raza cilindrului supus prelucrării are valoarea maximă  $r_{OP} = r_{OPmax}$  iar în momentul final aceasta va fi nulă.

În corpul obiectului de prelucrat transmiterea căldurii are loc dinspre exterior spre interior, de-a lungul razei, după direcțiile  $Oy$  și  $Oz$ , iar pe porțiunea  $L$  după direcția  $Ox$ , din interior spre exteriorul volumului de material considerat. Schematizat, evoluția acestui proces este reprezentată în tabelul 5.2.

Analizând aceste reprezentări putem defini câmpul termic ca fiind de tip *butoi*.

Metoda de prelucrare cu obiect de prelucrat în mișcare de rotație și obiect de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare se folosește în cazul semifabricatelor de diametre mari dar care respectă condiția dată de relația 5.10:

$$r_{OP} < r_{OT} \quad (5.10)$$

Pe același principiu se bazează prelucrarea dimensională în cazul utilizării obiectului de prelucrat în mișcare de avans radial de prelucrare și a obiectului de transfer fix, iar etapele propagării câmpului termic sunt cele prezentate în tabelul 5.1.

c) *Obiect de prelucrat (cilindru) – obiect de transfer disc cu avans combinat*

Varianta de prelucrare cu avans combinat este reclamată de necesitatea prelucrării unor semifabricate de dimensiuni mari fără însă a fi nevoie de diametre mari ale obiectului de transfer.

Astfel, etapa inițială a prelucrării se desfășoară conform variantei „a”, până când punctul M aparținând obiectului de transfer depășește centrul O al obiectului de prelucrat pe o adâncime suficient de mare ca să compenseze uzura. Când s-a realizat această cotă, din considerente dimensionale dar și de penetrare a lichidului de lucru în zona activă, avansul obiectului de transfer devine nul și se acționează avansul circular al obiectului de prelucrat, până la finalizarea prelucrării.

În tabelul 5.3 sunt reprezentate etapele propagării câmpului termic în cazul avansului combinat.

Analizând reprezentările din tabel se constată propagarea câmpului termic sub formă de lacrimă în prima parte a prelucrării, iar în cea finală propagarea sub formă de butoi. Prin urmare, forma finală a câmpului termic se poate defini ca fiind de tip *pară*.

#### 5.4.2.3. Debitare - obiect de prelucrat tubular (țevă)

Considerăm obiectul de transfer un disc cu diametrul  $D_{OT}$  și grosimea  $g_{OT}$  iar obiectul de prelucrat o țevă cu diametrul exterior  $D_{eOP}$  și peretele de grosime  $h$  corespunzătoare înălțimii de prelucrare. În funcție de diametrul exterior al țevii și de obiectivul prelucrării, se poate adopta una din următoarele metode:

- obiect de prelucrat fix – obiect de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare;
- obiect de prelucrat în mișcare de rotație – obiect de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare;
- obiect de prelucrat – obiect de transfer cu avans combinat.

Folosind același algoritm ca și la studiul corpurilor cilindrice, considerăm, în cazul prelucrării țevilor, dimensiunea finită  $L$  alcătuită conform relației 5.7 din porțiunea influențată termic ( $l' + l'$ ) a obiectului de prelucrat și grosimea  $g_{OT}$  definită conform relației 5.8 (figura 5.5).

Etapile propagării câmpului termic se analizează, și în acest caz, în variantele enunțate.



Tabelul 5.1

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat (cilindru) fix – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_0 = 0$ $h_0 = 0$ $h'_0 = D_{OP}$ $t = t_0 = t_{amb}$ $T = T_0$ $q = q_0$
II		$\tau = \tau_i$ $t = t_i = t_{prel}$ $T = T_i$ $q = q_i$
III		$\tau = \tau_i$ $t = t_i = t_{prel}$ $T = T_i$ $q = q_i = q_{max}$
IV		$\tau = \tau_{f-1}$ $t = t_{f-1} = t_{prel}$ $T = T_{f-1}$ $q = q_{f-1}$
V		$\tau = \tau_f$ $t = t_f = t_{amb} + \Delta t$ $T = T_f$ $q = q_f$



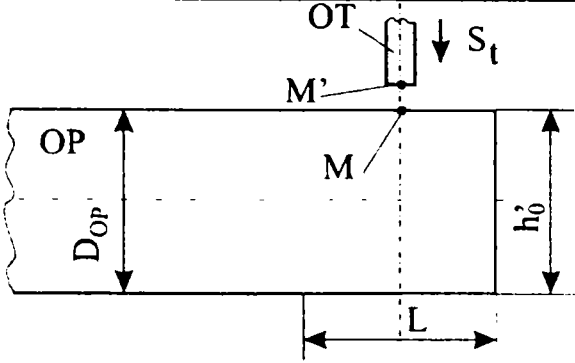
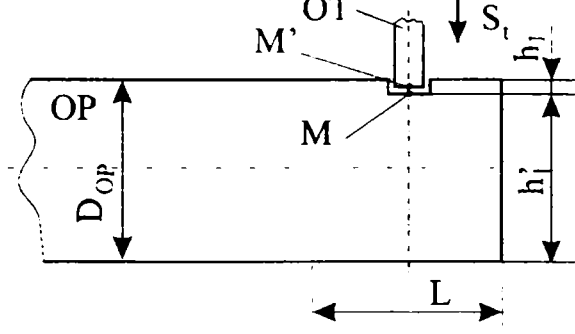
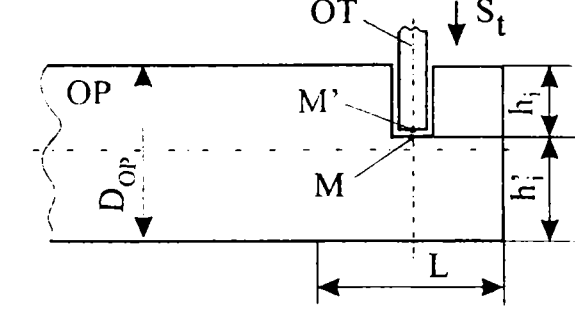
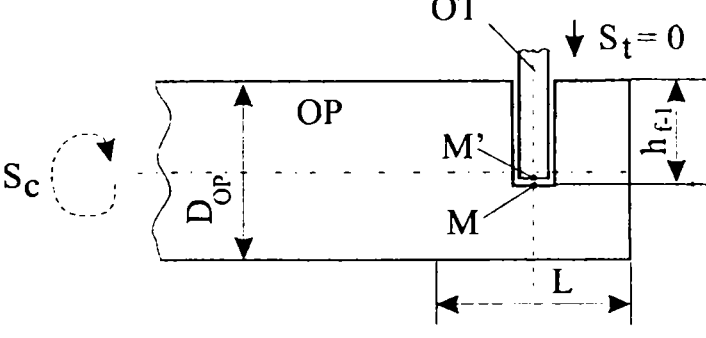
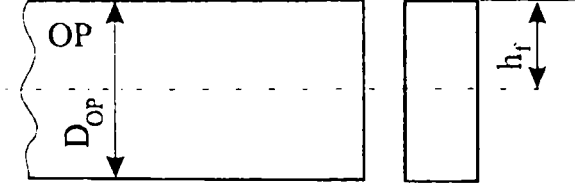
Tabelul 5.2

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat (cilindru) în mișcare de rotație – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_0 = 0$ $h = h_0 = 0$ $r = r_0 = r_{\max}$ $t = t_0 = t_{\text{amb}}$ $T = T_0 = T(t_0, r_{\max})$ $q = q_0$
II		$\tau = \tau_1$ $h = h_1 = r_0 - r_1$ $r = r_1$ $t = t_1 = t_{\text{prel}}$ $T = T_1 = T(t_1, r_1)$ $q = q_1 = q_{\max}$
III		$\tau = \tau_i$ $h = h_i = r_0 - r_i$ $r = r_i$ $t = t_i$ $T = T_i = T(t_i, r_i)$ $q = q_i = q_{\max}$
IV		$\tau = \tau_{f-1}$ $h = h_{f-1} = r_0 - r_{f-1}$ $r = r_{f-1}$ $t = t_{f-1}$ $T = T_{f-1} = T(t_{f-1}, r_{f-1})$ $q = q_{f-1}$
V		$\tau = \tau_f$ $h = h_f = r_0 - r_f = r_{\max}$ $r = r_f = 0$ $t = t_f$ $T = T_f = T(t_f, r_f)$ $q = q_f$

Tabelul 5.3

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat cilindru – obiect de transfer disc cu avans combinat

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_o = 0$ $h = h_o = 0$ $h'_o = D_{OP}$ $t = t_o = t_{amb}$ $T = T_o$ $q = q_o$
II		$\tau = \tau_1$ $t = t_1 = t_{prel}$ $T = T_1$ $q = q_1$
III		$\tau = \tau_i$ $t = t_i = t_{prel}$ $T = T_i$ $q = q_i$
IV		$\tau = \tau_{f-1}$ $t = t_{f-1} = t_{prel}$ $T = T_{f-1}$ $q = q_{f-1} = q_{max}$
V		$\tau = \tau_f$ $t = t_f = t_{amb}$ $T = T_f$ $q = q_f$

a) *Obiect de prelucrat tubular (țeavă) fix – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare*

Obiectul de transfer disc, în mișcarea de avans de prelucrare, perpendicular pe axa longitudinală a țevii, vine în contact cu suprafața exterioară a acesteia în punctul M, în momentul inițial  $\tau_0$  al prelucrării. Cum avansul se realizează după diametrul obiectului de prelucrat ( $D_{OP}$ ), punctul M de contact are o traiectorie liniară de-a lungul acestui diametru, până la sfârșitul cursei de avans, în momentul final  $\tau_f$  al debitării.

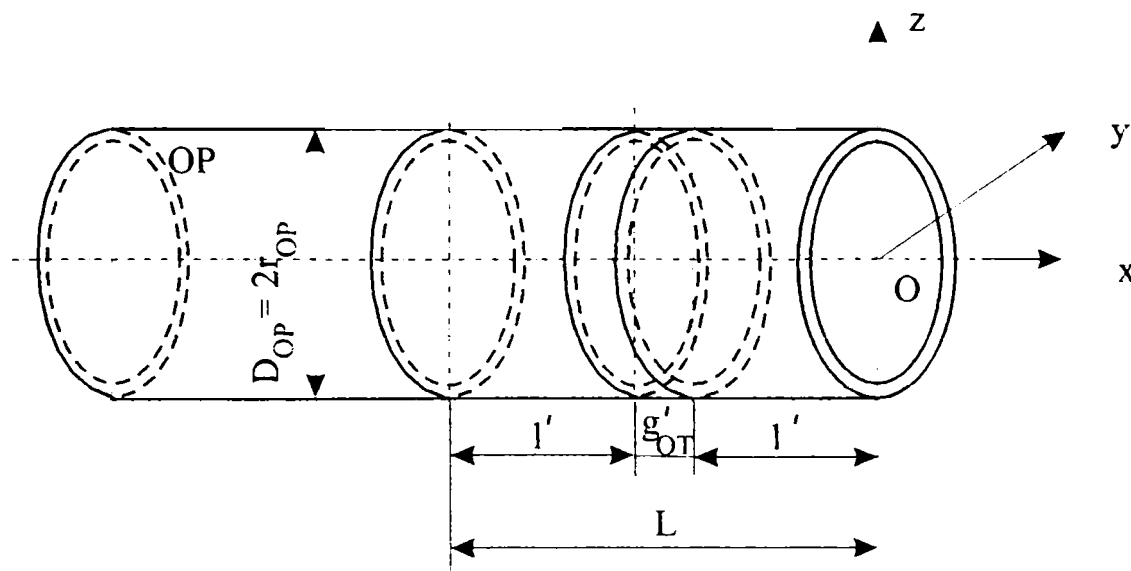


Fig. 5.5. Reprezentarea schematizată a obiectului de prelucrat tubular – țevă cu lungime finită

Punctului M de pe obiectul de prelucrat îi corespunde punctul M' pe obiectul de transfer. Acesta are în cursul debitării:

- o cursă activă  $c_{a1} = h$ ;
- o cursă în gol  $c_g = D_{OP} - 2h$ ;
- o cursă activă  $c_{a2} = h$ .

La momentul  $\tau_0 + \Delta\tau_i$ , puncte simetrice punctului M' de pe obiectul de transfer ( $M'_{i1}, M'_{i2}$ ) vin în contact cu puncte simetrice punctului M de pe obiectul de prelucrat ( $M_{i1}, M_{i2}$ ) și se realizează astfel prelucrarea, din aproape în aproape, a suprafeței active  $S_a$  a obiectului de prelucrat (fig.5.6). Pentru simplificarea studiului de caz se consideră în această etapă traiectoria singulară a punctului M. Concomitent cu deplasarea sa se propagă și câmpul termic, atât în direcție radială cât și după axa  $Ox$ , conform reprezentării din tabelul 5.4. Analizând aceste reprezentări, constatăm prezența în procesul de prelucrare a unui câmp termic momentan de tip sferic care, propagându-se, determină un câmp termic inelar, de diametru variabil.

Prelucrarea prin eroziune complexă a țevilor fixe și a obiectului de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare se folosește la semifabricate de diametre mici, la care este respectată relația 5.9, indiferent de grosimea peretelui țevii.

În cazul folosirii unui utilaj la care obiectul de transfer este fix și obiectul de prelucrat (țeava) execută avansul radial, prelucrarea se realizează după același principiu ca și în cazul obiectului de prelucrat fix și a celui de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare, urmând etapele prezentate în tabelul 5.4.

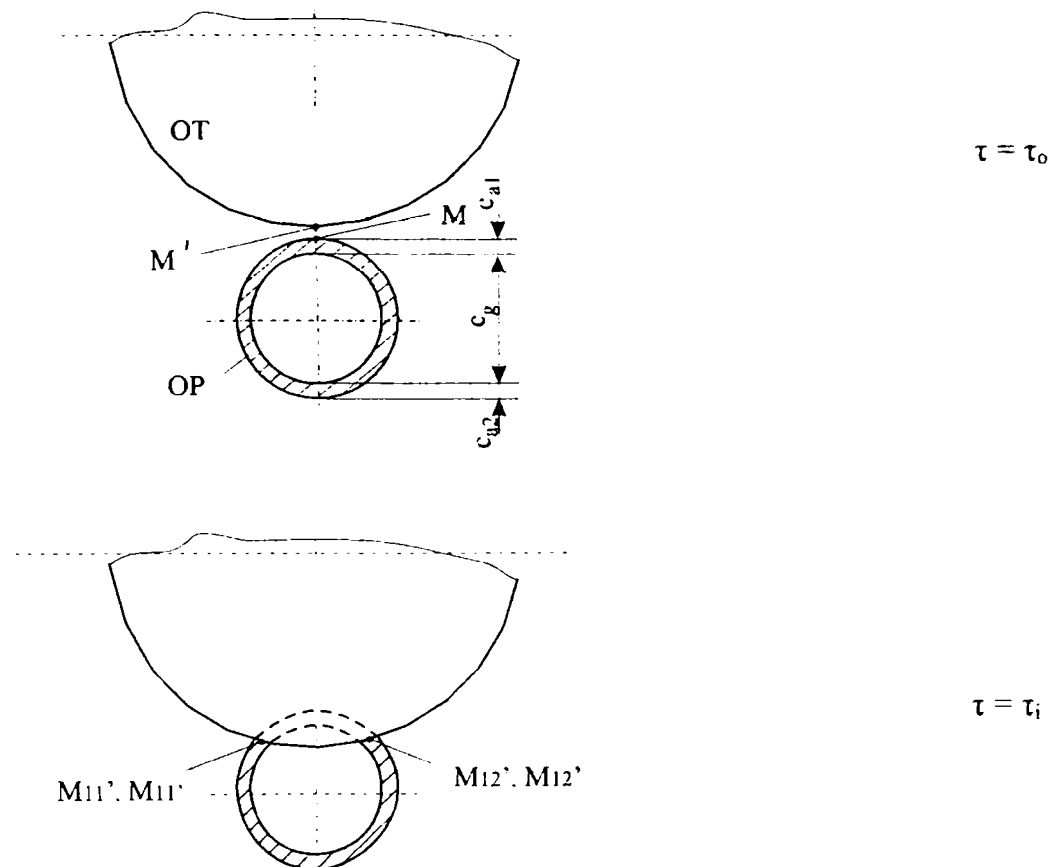


Fig. 5.6. Reprezentarea schematizată a obiectului de prelucrat și a celui de transfer în etapa inițială a prelucrării și în momentul  $\tau_i$

b) *Obiect de prelucrat tubular (țeavă) în mișcare de rotație – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare*

Țeava de diametru  $D_{OP}$  se rotește cu turația  $n$ , din momentul inițial al prelucrării  $\tau_0$  și până în momentul final  $\tau_f$  când s-a realizat debitarea, proces în care obiectul de transfer disc are mișcarea de avans de la diametrul exterior înspre axa țevii.

În corpul țevii transmiterea căldurii are loc dinspre exterior înspre interior, de-a lungul razei și pe porțiunea  $L$  după direcția  $Ox$ , din interiorul spre exteriorul volumului de material considerat. Datorită adâncimii de pătrundere relativ mici, comparativ cu debitarea corpurilor cilindrice pline.

Tabelul 5.4

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat (țeavă) fix – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_0 = 0$ $h_0 = 0$ $h'_0 = D_{OP}$ $t = t_0 = t_{amb}$ $T = T_0$ $q = q_0$
II		$\tau = \tau_1$ $t = t_1 = t_{prel}$ $T = T_1$ $q = q_1$
III		$\tau = \tau_i$ $t = t_i = t_{prel}$ $T = T_i$ $q = q_i$
IV		$\tau = \tau_{f-1}$ $t = t_{f-1} = t_{prel}$ $T = T_{f-1}$ $q = q_{f-1} = q_{max}$
V		$\tau = \tau_f$ $t = t_f = t_{amb} + \Delta t$ $T = T_f$ $q = q_f$

câmpul termic local, de tip sferă, are o extindere redusă și formă ușor aplatizată, în funcție de grosimea țevii. În ansamblul prelucrării, câmpul termic ia o formă inelară de diametru variabil.

Metoda de debitare cu obiect de prelucrat țevă în mișcare de rotație și obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare se folosește în cazul semifabricatelor de diametre mari și care respectă condiția dată de relația 5.10.

Schematizat, evoluția procesului este reprezentată în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat (țevă) în mișcare de rotație – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_o = 0$ $h = h_o = 0$ $r = r_o = r_{max}$ $t = t_o = t_{amb}$ $T = T_o = T(t_o, r_{max})$ $q = q_o$
II		$\tau = \tau_1$ $h = h_1 = r_o - r_1$ $r = r_1$ $t = t_1 = t_{prel}$ $T = T_1 = T(t_1, r_1)$ $q = q_1 = q_{max}$
III		$\tau = \tau_f$ $h = h_f = h_{\text{țevă}}$ $r = r_f = r_{max} - h_{\text{țevă}}$ $t = t_f$ $T = T_f = T(t_f, r_f)$ $q = q_f$

c) Obiect de prelucrat tubular (țevă) – obiect de transfer disc cu avans combinat

Varianta de prelucrare cu avans combinat se utilizează la debitarea unor țevi de diametre mari fără însă a fi necesare obiecte de transfer de diametre mari.

Etapa inițială a prelucrării se desfășoară conform variantei „a”, până când punctul M’ aparținând obiectului de transfer depășește, în cursa sa, grosimea peretelui țevii. Când s-a realizat

această pătrundere, din considerente dimensionale, avansul obiectului de transfer devine nul și se acționează avansul circular al obiectului de prelucrat, până la finalizarea debitării.

În tabelul 5.6 sunt reprezentate etapele propagării câmpului termic sferic ce determină câmpul termic final de formă inelară.

Tabelul 5.6

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat (țeavă) – obiect de transfer disc cu avans combinat

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_0 = 0$ $h_0 = 0$ $h'_0 = D_{OP}$ $t = t_0 = t_{amb}$ $T = T_0$ $q = q_0$
II		$\tau = \tau_1$ $t = t_1 = t_{prel}$ $T = T_1$ $q = q_1$
III		$\tau = \tau_{f-1}$ $t = t_{f-1} = t_{prel}$ $T = T_{f-1}$ $q = q_{f-1} = q_{max}$
IV		$\tau = \tau_f$ $h = h_f = h_{\text{țeavă}}$ $r = r_f = r_{max} - h_{\text{țeavă}}$ $t = t_f$ $T = T_f = T(t_f, r_f)$ $q = q_f$

#### 5.4.2.4. Realizare fante - obiect de prelucrat tubular (țeavă)

Pentru realizarea fantelor necesare a fi practicate în diverse piese tubulare, se poate folosi prelucrarea prin eroziune complexă cu obiect de transfer disc.

Considerăm obiectul de transfer un disc având diametrul  $D_{OT}$  și grosimea  $g_{OT}$  iar obiectul de prelucrat tubular o țevă cu diametrul exterior  $D_{eOP}$  și peretele de grosime  $h$ , ceea ce constituie adâncimea de prelucrare.

În acest mod se pot realiza fante longitudinale în diverse dispuneri de-a lungul generatoarelor, fante transversale dispuse perpendicular pe axa țevii și fante oblice dispuse la un unghi oarecare față de axă.

Fantele longitudinale pot fi practicate în peretele obiectului de prelucrat tubular în diverse dispuneri, cum ar fi:

- fante paralele de lungime mică și cu pas constant, dispuse pe toată lungimea țevii;
- fante paralele de lungime mare, dispuse pe toată lungimea țevii, până aproape de extremități;
- fante paralele dispuse la extremități;
- fante paralele, cu pas constant, dispuse în tablă de șah;
- fante paralele dispuse aleator etc.

Printre metodele de prelucrare utilizate în acest scop se numără:

- obiect de prelucrat în mișcare de avans longitudinal și circular de poziționare – obiect de transfer disc cu avans transversal de prelucrare;
- obiect de prelucrat în mișcare de avans longitudinal și circular de poziționare – obiect de transfer disc cu avans transversal de pătrundere și inițiere a fantei și avans longitudinal de prelucrare;
- obiect de prelucrat în mișcare de avans circular de poziționare și avans longitudinal de prelucrare – obiect de transfer disc cu avans exclusiv de pătrundere și inițiere a fantei etc;

Dispunerea fantelor transversale se poate realiza:

- echidistant pe circumferința obiectului de prelucrat, cu pas longitudinal constant;
- în tablă de șah;
- pe un anumit sector al obiectului de prelucrat;
- aleator.

Pentru prelucrarea acestora se pot utiliza mai multe metode, semnificative fiind:

- obiect de prelucrat în mișcare de avans longitudinal și circular de poziționare – obiect de transfer disc cu avans radial de prelucrare;



- obiect de prelucrat în mișcare de avans longitudinal de poziționare și avans circular de prelucrare – obiect de transfer disc cu avans transversal exclusiv de pătrundere și inițiere a fantei;
- obiect de prelucrat în mișcare de avans circular de poziționare – obiect de transfer disc cu avans avans longitudinal de poziționare avans radial de prelucrare etc;

Realizarea fantelor oblice complică utilajul de prelucrare deoarece reclamă integrarea mișcărilor celor doi electrozi precum și adaptarea prinderii obiectului de transfer la unghiul de prelucrare necesar.

Pentru a urmări etapele realizării fantelor, metoda de prelucrare se analizează pentru o variantă a fantelor longitudinale și una a celor transversale, principiul său putând fi generalizat și pentru celelalte variante.

a) *Realizarea fantelor longitudinale în obiect de prelucrat tubular (țeavă) cu mișcare de avans longitudinal și circular de poziționare – obiect de transfer disc cu avans transversal de prelucrare*

Considerăm un obiect de prelucrat de formă tubulară (țeavă) în care este necesar să se realizeze fante longitudinale de lungime  $L$ , echidistante pe circumferința acestuia (figura 5.7).

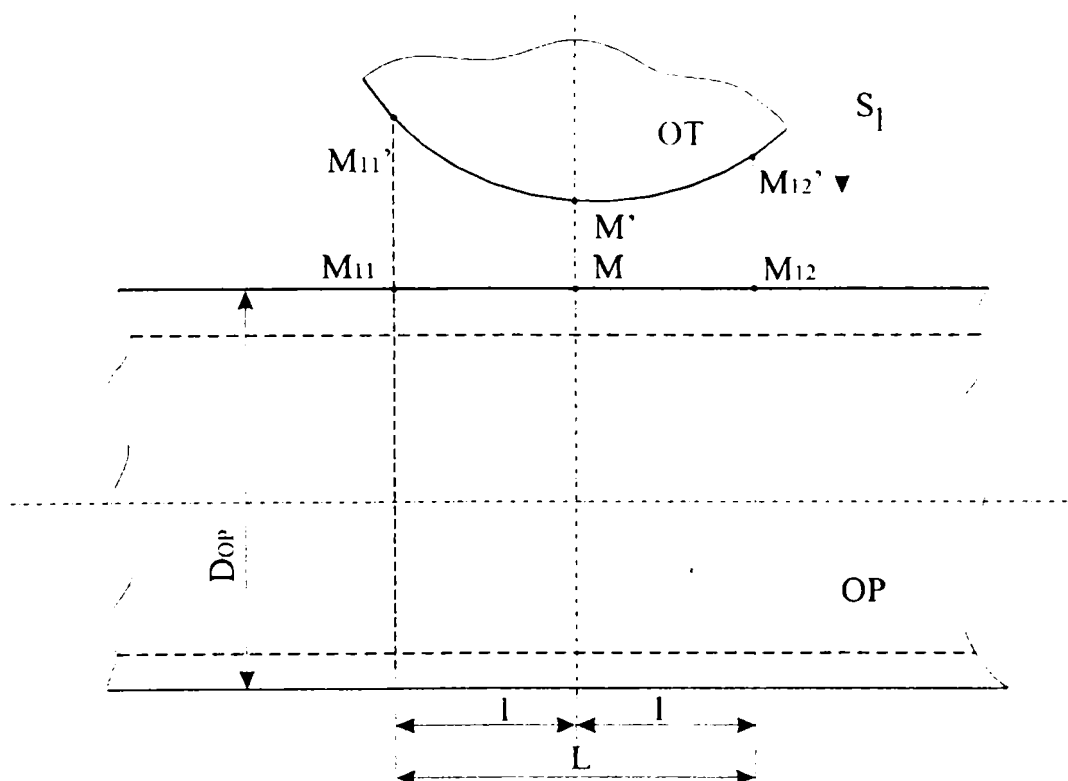


Fig. 5.7. Reprezentarea schematică a obiectului de prelucrat tubular (țeavă) cu lungime finită supus realizării fantelor longitudinale

Obiectul de transfer disc executând mișcarea de avans transversal de pătrundere vine în contact cu suprafața exterioară a obiectului de prelucrat tubular (țeavă) în punctul M, în momentul inițial  $\tau_0$  și continuă prelucrarea până când coarda arcului de cerc ce realizează prelucrarea ( $M_{11}M_{12}$ ) devine egală cu lungimea L a fantei, în momentul final  $\tau_f$ .

Reprezentarea schematizată a evoluției procesului este prezentată în tabelul 5.7.

Concomitent cu desfășurarea procesului eroziv, din tabelul 5.7 se poate estima și evoluția câmpului termic.

*b) Realizarea fantelor transversale în obiect de prelucrat tubular (țeavă) cu mișcare de avans longitudinal și circular de poziționare – obiect de transfer disc cu avans radial de prelucrare*

Obiectul de transfer disc, în mișcarea de avans de prelucrare, perpendicular pe axa longitudinală a țevii, vine în contact cu suprafața exterioară a acesteia în punctul M, în momentul inițial  $\tau_0$  al prelucrării. Cum avansul se realizează după diametrul obiectului de prelucrat ( $D_{OP}$ ), punctul M de contact are o traiectorie liniară de-a lungul acestui diametru, până la sfârșitul cursei de avans, în momentul final  $\tau_f$  al debitării, când coarda arcului de cerc ce realizează prelucrarea ( $M_{11}M_{12}$ ) devine egală cu lungimea L a fantei (figura 5.8).

Concomitent cu deplasarea sa se propagă și câmpul termic, atât în direcție radială cât și după axa  $Ox$ , conform reprezentării din tabelul 5.8.

### **5.4.3. Stabilirea ecuațiilor transferului de căldură la debitarea prin eroziune complexă a unui obiect de prelucrat cilindric, cu obiectul de transfer disc**

#### **5.4.3.1. Considerații teoretice privind transmiterea căldurii în obiectul de prelucrat cilindru cu extindere infinită**

Pentru stabilirea ecuațiilor transferului de căldură la debitarea unui obiect de prelucrat de formă cilindrică, se consideră regimul termic nestaționar [4, 8, 69, 72, 84] iar cilindrul cu raza  $r_{OP}$  cu o lungime foarte mare (extindere infinită) pentru a neglija efectele termice de la capătul cilindrului (figura 5.9).

Reluând considerentele teoretice și ipotezele emise în capitolul 5.4.2.2, se încearcă stabilirea ecuațiilor pentru cazurile „a” ( obiect de prelucrat fix – obiect de transfer în mișcare de avans radial de prelucrare).

Tabelul 5.7

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat tubular (țeavă) cu mișcare de avans longitudinal și circular de poziționare – obiect de transfer disc în mișcare de avans transversal de prelucrare, la realizarea fantelor longitudinale

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_o = 0$ $h_o = 0; h'_o = D_{OP}$ $L = L_o = 0$ $t = t_o = t_{amb}$ $T = T_o$ $q = q_o$
II		$\tau = \tau_1$ $L = L_1 = M_{i1}M_{12}$ $t = t_1 = t_{prel}$ $T = T_1$ $q = q_1$
III		$\tau = \tau_i$ $L = L_i = M_{i1}M_{i2}$ $t = t_i = t_{prel}$ $T = T_i$ $q = q_i$
IV		$\tau = \tau_{f-1}$ $L = L_{f-1} = M_{f-1,1}M_{f-1,2}$ $t = t_{f-1} = t_{prel}$ $T = T_{f-1}$ $q = q_{f-1} = q_{max}$
V		$\tau = \tau_f$ $L = L_f$ $t = t_f = t_{amb} + \Delta t$ $T = T_f$ $q = q_f$

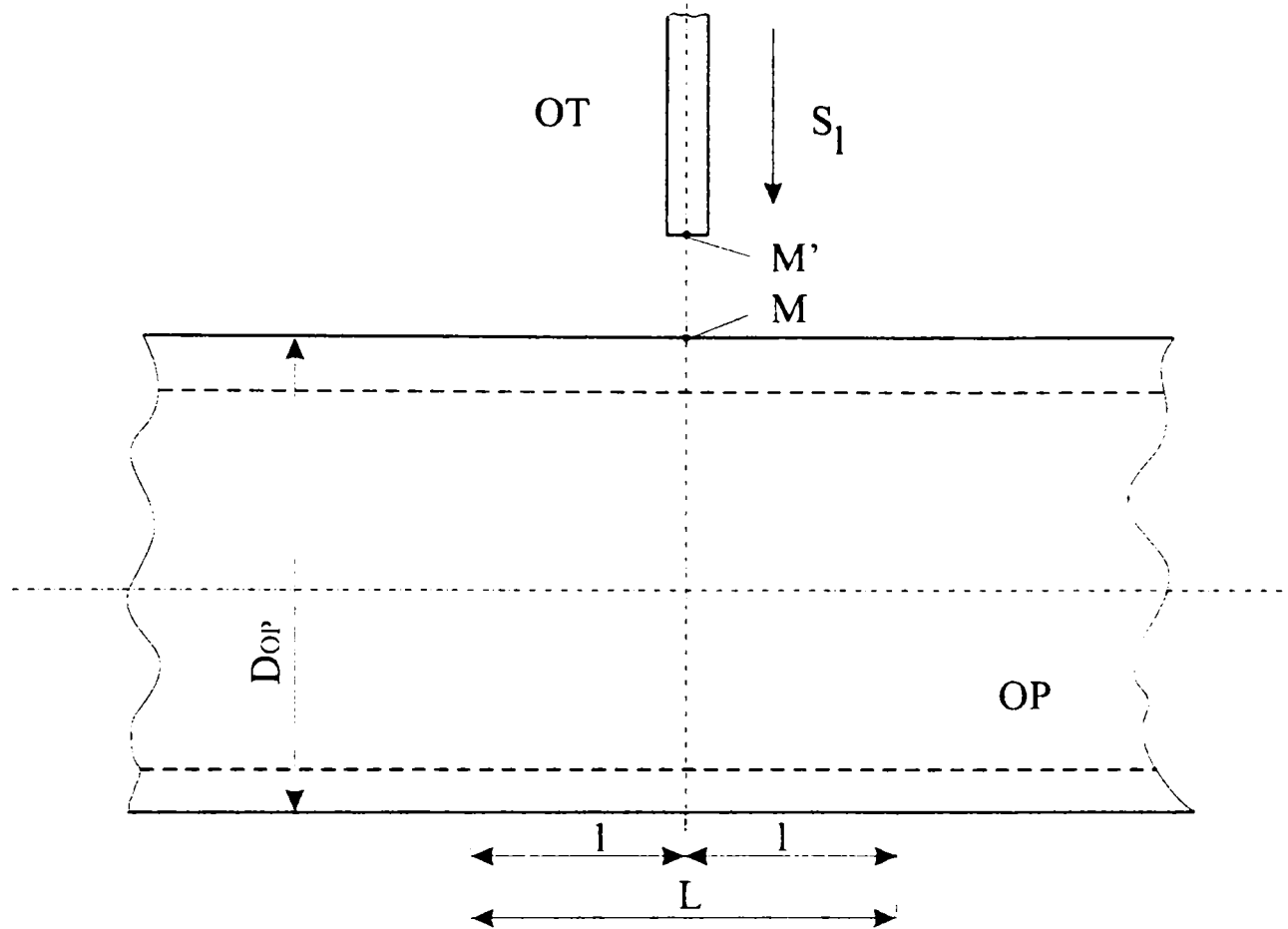


Fig. 5.8. Reprezentarea schematizată a obiectului de prelucrat țevă cu lungime finită supus realizării fantelor transversale

Se consideră că la momentul  $\tau_0 = 0$  cilindru are o temperatură constantă în toată masa materialului, egală cu temperatura mediului ambiant ( $t_0 = t_{OP} = t_{amb} = \text{const.}$ ).

Reprezentăm cilindru în axele de coordonate temperatură „ $t$ ”, care trece prin axa cilindrului, și direcția razei curente „ $r$ ”.

Cum în cilindru nu există surse interne de căldură, ecuația generală a conductivității termice a lui Fourier, scrisă în coordonate cilindrice, este de forma:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) \quad (5.11)$$

Tabelul 5.8

Etapele propagării câmpului termic obiect de prelucrat (țevă) cu avans longitudinal și circular de poziționare – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare, la realizarea fantelor transversale

Etapa	Reprezentare grafică	Caracteristici
I		$\tau = \tau_o = 0$ $h_o = 0; h'_o = D_{OP}$ $L = L_o = 0$ $t = t_o = t_{amb}$ $T = T_o$ $q = q_o$
II		$\tau = \tau_1$ $L = L_1$ $t = t_1 = t_{prel}$ $T = T_1$ $q = q_1$
III		$\tau = \tau_i$ $L = L_i$ $t = t_i = t_{prel}$ $T = T_i$ $q = q_i$
IV		$\tau = \tau_{f-1}$ $L = L_{f-1}$ $t = t_{f-1} = t_{prel}$ $T = T_{f-1}$ $q = q_{f-1} = q_{max}$
V		$\tau = \tau_f$ $L = L_f$ $t = t_f = t_{amb} + \Delta t$ $T = T_f$ $q = q_f$

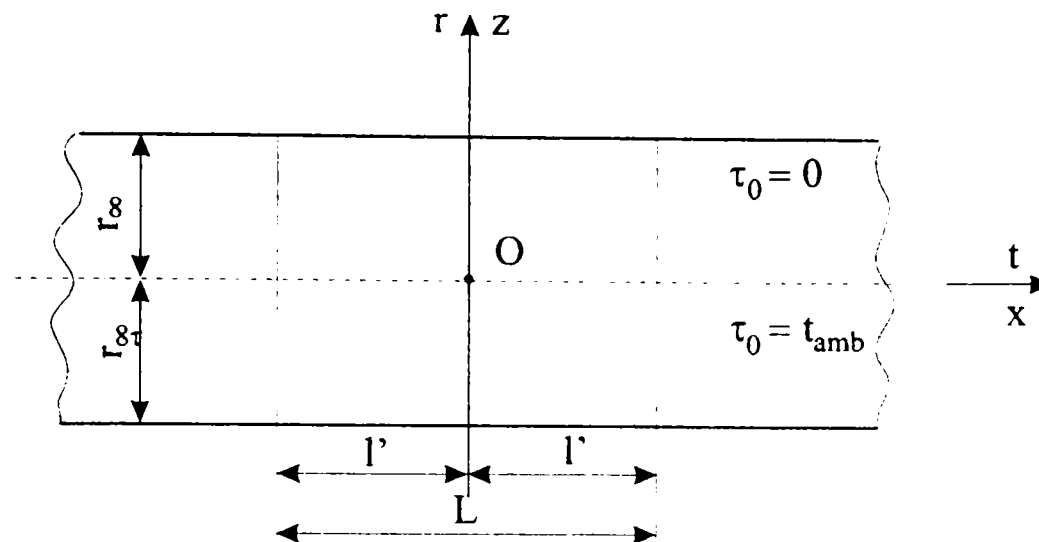


Fig. 5.9. Obiectul de prelucrat – cilindru de extindere infinită

unde:  $a$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] – difuzivitatea termică a corpului;

$\varphi$  – o funcție continuă dependentă de timp.  $\varphi(\tau)$ .

Difuzivitatea termică este o măsură a inerției termice și metalele au o difuzivitate termică ridicată, deci o inerție termică redusă.

Difuzivitatea termică se exprimă cu relația 5.12:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (5.12)$$

unde:  $\lambda$  [ $\text{W}/\text{mK}$ ] – conductivitatea termică a materialului la temperatura la care are loc schimbul de căldură;

$\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] – densitatea materialului (masa specifică);

$c$  [ $\text{J}/\text{kg K}$ ] – căldura specifică masică.

Procesul de prelucrare prin eroziune complexă este constituit, în quantum preponderent, din descărcări electrice în impuls care determină transformarea energiei electrice în energie termică, ajungându-se la temperaturi cuprinse în intervalul  $10000 \div 15000\text{K}$ . Prin urmare, de la localizarea punctiformă a energiei termice, respectiv a temperaturilor înalte, căldura se transmite în volumul delimitat al cilindrului prin conducție iar acesta, ajungând la temperatură mai mare decât a mediului ambiant, cedează acestuia căldură prin convecție și radiație.

În această situație se notează cu  $\theta$  diferența dintre temperatura cilindrului  $t_{OP}$  în momentul  $\tau_i$  al prelucrării și cea a mediului ambiant (mediul de lucru ML)  $t_{ML}$ .

$$\theta = t_{OP} - t_{ML} \quad (5.13)$$

iar ecuația 5.11 devine:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (5.14)$$

Densitatea fluxului de căldură  $q_r$ , transmis prin conducție termică în corpul cilindrului la distanța  $r = r_{OP}$ , în condiții de limită, se consideră egal cu diferența dintre densitatea fluxului termic dezvoltat ca urmare a efectului Joule–Lenz  $q_E$  și cea a fluxului de căldură transmis mediului ambiant (mediul de lucru) prin convecție și radiație  $q_{ML}$ :

$$-\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_{r=r_{OP}} = q_E - q_{ML} \quad (5.15)$$

relație ce poate fi scrisă sub forma:

$$-\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_{r=r_{OP}} = \sigma \cdot E^2 - \alpha \theta \quad (5.16)$$

Considerând cele de mai sus și reprezentarea din figura 5.9, se constată că temperatura variază în funcție de rază ( $r$ ) și de timp ( $\tau$ ) pe direcția Oz, în funcție de timp ( $\tau$ ) și de depărtarea de punctul de prelucrare pe direcția Ox. Prin urmare, putem scrie această dependență în forma:

$$\theta = f(\tau, r, x, \varphi) \quad (5.17)$$

Pentru determinarea câmpului termic  $\theta$  se impune rezolvarea ecuației cu derivate parțiale 5.14, împreună cu condițiile mixte (inițiale și de frontieră).

Rezolvarea sistemului se poate simplifica dacă, utilizând metoda separării variabilelor, vom găsi o funcție  $\theta$  ca fiind produsul a patru funcții derivabile, una dependentă numai de timp  $\varphi(\tau)$ , una dependentă numai de rază  $\psi(r)$ , una dependentă de depărtarea de-a lungul axei cilindrului și cea de a patra dependentă de funcția  $\varphi$ , astfel încât relația 5.17 să devină:

$$\theta = \varphi(r) \cdot \psi(r) \cdot f(x) \cdot g(\varphi) \quad (5.18)$$

Înlocuind derivatele parțiale ale funcției  $\theta$  în ecuația 5.14, aceasta se reduce la patru ecuații diferențiale ordinare, a căror rezolvare [69, vol. III, pag. 161] poate defini câmpul termic.

Metoda este deosebit de laborioasă, depășind cadrul acestei analize și de aceea, metoda abordată în studiul câmpului termic este metoda elementului finit.



## 6. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ

### 6.1. Caracteristici constructive și funcționale ale utilajului de prelucrare

Pentru studiul câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă, determinările experimentale necesare s-au realizat în laboratorul de prelucrări prin eroziune complexă al Catedrei de Tehnologie Mecanică iar utilajul (MEC 50) folosit în acest scop este reprezentat în figura 6.1.

În componența acestui utilaj, ca de altfel la orice utilaj destinat prelucrării prin eroziune complexă, deosebit patru sisteme funcționale care prin acțiunea lor comună fac posibilă realizarea prelucrării:

a) *Sistemul mecanic*, asigură:

- instalarea obiectului de prelucrat și a obiectului de transfer;
- cinematica necesară generării suprafețelor;
- păstrarea constantă a interstițiului prelucrării;
- realizarea avansului obiectului de prelucrat sau a obiectului de transfer, necesar prelucrării;
- dirijarea corespunzătoare a lichidului de lucru;
- evacuarea surplusului de lichid de lucru, a produselor eroziunii și a aerosolilor formați.

b) *Sistemul pentru electrolit*, permite stocarea, curățirea și recircularea lichidului de lucru.

c) *Sistemul de alimentare cu energie electrică*, asigură energia necesară constituirii agenților erozivi și alimentarea cu energie a celorlalte sisteme.

d) *Sistemul de comandă și reglare*, acționează asupra tuturor sistemelor prezentate anterior, interdependente integral.

Utilajul MEC 50 este o mașină universală cu obiect de transfer disc, ce permite executarea operațiilor tehnologice de debitare, ascuțire și realizare a fantelor. Obiectul de transfer execută avansul manual de poziționare în plan vertical și longitudinal și mișcarea principală de prelucrare (rotație), iar obiectul de prelucrat execută avansul de lucru electromecanic transversal.

Pentru desfășurarea procesului eroziv având drept scop debitarea prin eroziune complexă a unor semifabricate cilindrice tip bară, utilajul de prelucrare funcționează la parametrii electrotehnologici prezentați în tabelul 6.1.

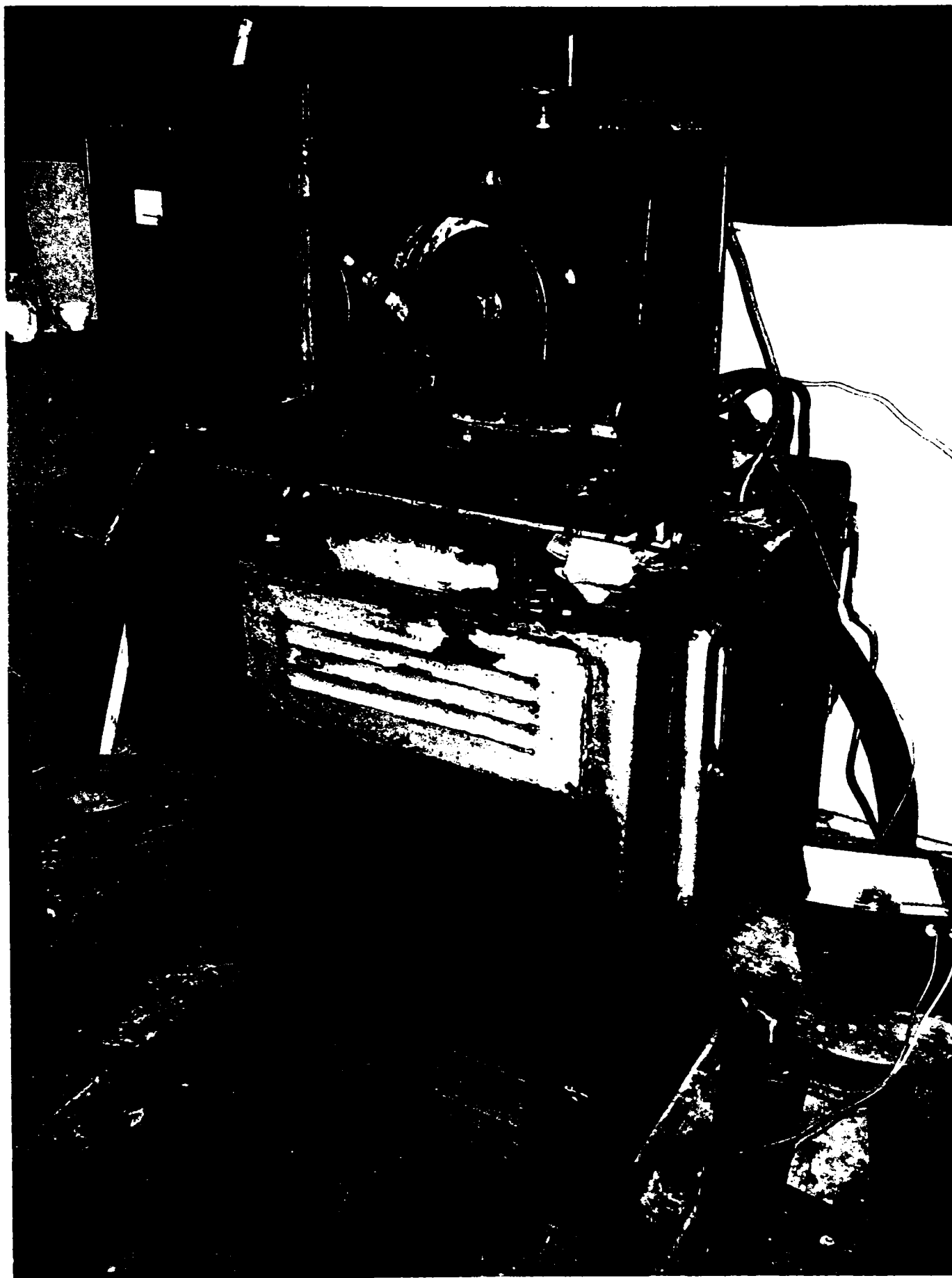


Fig. 6.1. Utilajul pentru prelucrarea prin eroziune complexă MEC 50

Tabelul 6.1

## Parametri de intrare specifici utilajului

Nr. crt.	Parametru de intrare	Unitate de măsură	Valoare	Observații
1.	Natura circuitului electric			Rezistiv, cu posibilități de a intercala inductivități
2.	Tensiunea electrică	V	10 – 40	
3.	Intensitatea maximă a curentului electric	A	50	
4.	Viteza relativă dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer	m/s	15 – 25	
5.	Cursa de lucru	m	0,25	
6.	Presiunea din spațiul de lucru	dan/ cm <sup>2</sup>	1,5...2,5	

**6.2. Caracteristici ale componentelor sistemului termodinamic primar**

Determinările experimentale urmăresc desfășurarea procesului de debitare, în vederea studiului câmpului termic, a semifabricatelor (obiect de prelucrat) de tipul celor prezentate în figura 6.2. și având caracteristicile principale cuprinse în tabelul 6.2.

Obiectul de transfer este un disc, în una din variantele prezentate în figura 6.3 și prezentând caracteristicile principale în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2

## Parametri de intrare specifici obiectului de prelucrat (OP) și obiectului de transfer (OT)

Nr. crt.	Parametru de intrare	Unitate de măsură	Valoare	Observații
1.	Material OP			Oțel aliat 13CrNi30
2.	Material OT			OL 37
3.	Diametru OP	mm	20	
4.	Lungime OP	mm	167,8	
5.	Diametru OT	mm	80	
6.	Grosime OT	mm	1	



Fig. 6.4. Soluția constructivă a obiectului de prelucrat

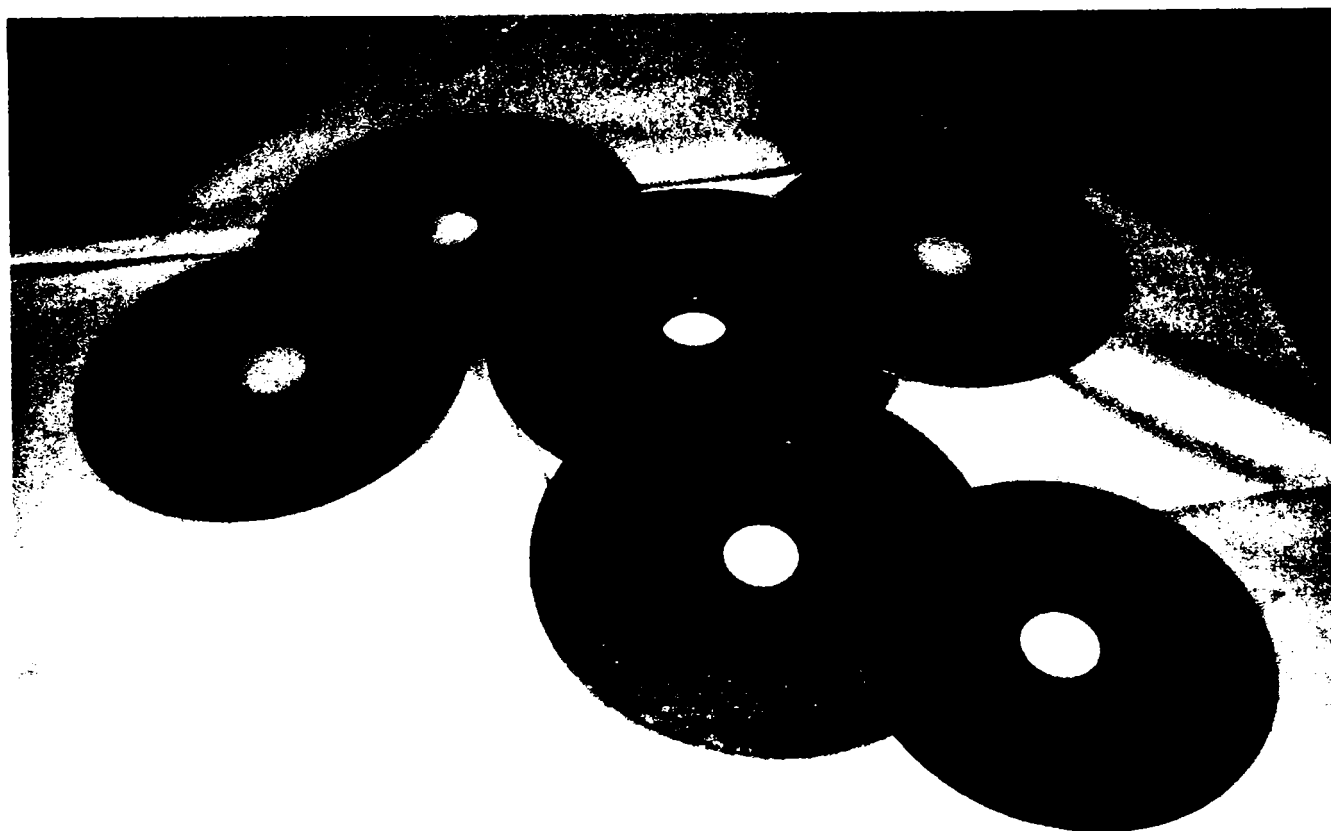


Fig. 6.3. Soluția constructivă a obiectului de transfer utilizat

Prelucrarea în vederea determinării influenței câmpului termic la debitarea prin eroziune complexă se realizează în prezența mediului de lucru (ML) introdus în sistemul termodinamic primar (figura 6.4) sub formă de jet. Caracteristicile acestuia sunt prezentate în tabelul 6.3

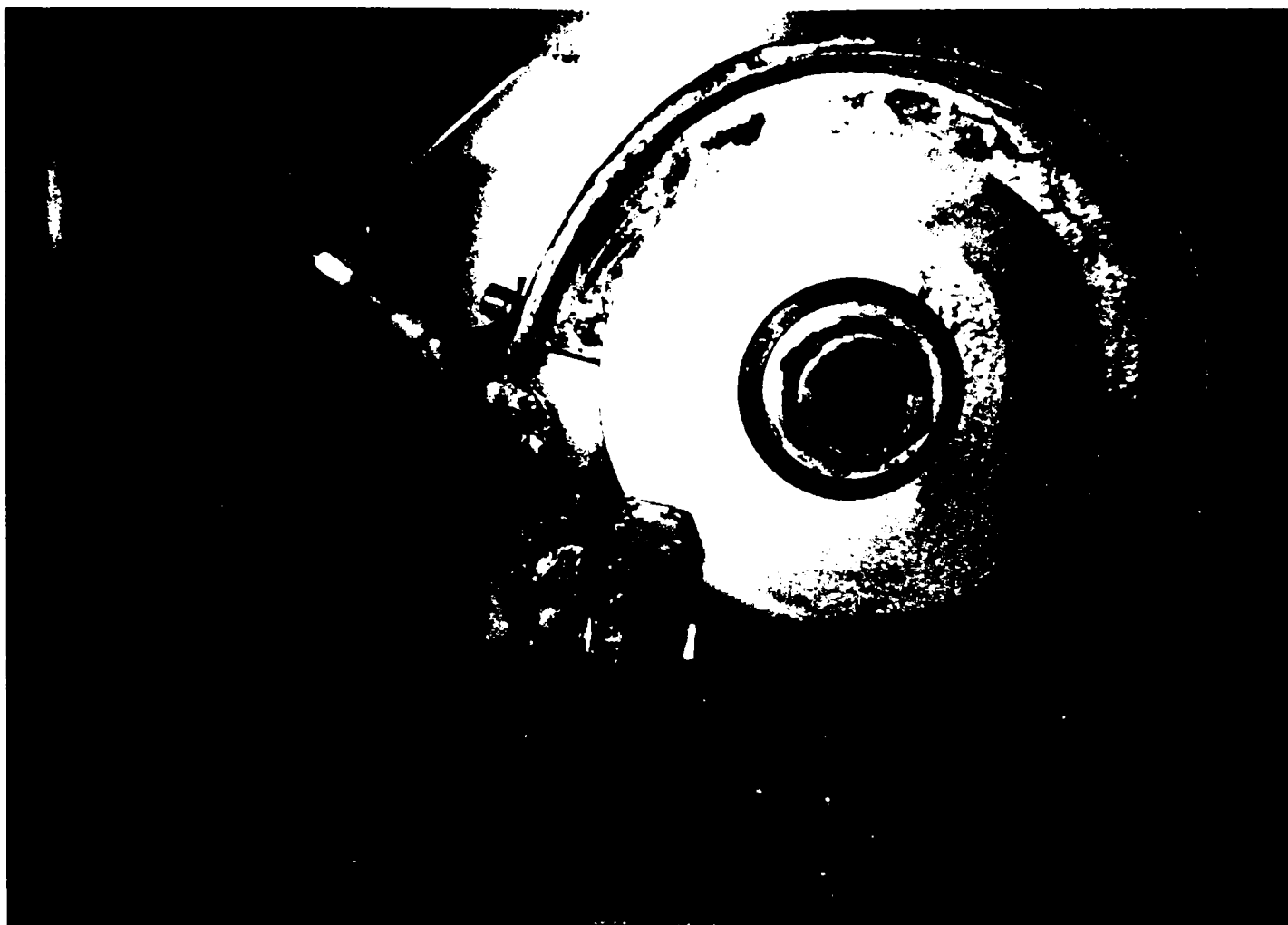


Fig. 6.4. Sistemul termodinamic primar (obiectul de prelucrat, obiectul de transfer și mediul de lucru)

Tabelul 6.3

Parametri de intrare specifici mediului de lucru (ML)

Nr. crt.	Parametru de intrare	Unitate de măsură	Valoare	Observații
1.	Natura ML			Silicat solubil de sodiu
2.	Compoziția chimică		$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	
3.	Densitate	Kg/m <sup>3</sup>	1100 ÷ 1250	
4.	Modul M		2,8 ÷ 3,2	

### 6.3. Măsurarea temperaturii în sistemul termodinamic primar

### 6.3. Măsurarea temperaturii în sistemul termodinamic primar

#### 6.3.1. Aparare de măsură

Măsurarea temperaturii în timpul prelucrării prin eroziune complexă (fig. 6.5 – conectare la obiectul de prelucrat și fig. 6.6 – conectare la obiectul de transfer) datorită complexității fenomenelor care au loc și a sistemului tehnologic în care se desfășoară este deosebit de dificilă și necesită utilizarea unor aparate de măsură speciale.

Descărcările electrice în impuls având o durată foarte mică ( $10^{-3} \div 10^{-5}$  s), determină creșteri punctiforme de temperatură până la  $10000 \div 15000$  K și chiar  $20000$  K, temperaturi care, cu mijloacele de măsurare accesibile și posibilitățile tehnice de captare, nu pot fi măsurate. Ele au fost estimate la aceste valori, în cercetări anterioare, prin studiile metalografice întreprinse asupra materialului obiectului de prelucrat în zona prelucrată, respectiv în materialul obiectului de transfer, în zona de contact cu materialul de prelucrat.

Măsurarea temperaturii, urmărește determinarea condițiilor de frontieră (temperatura la suprafață) pentru microsistemul obiect de prelucrat, respectiv obiect de transfer, condiții care determină schimbul de căldură între acestea și mediul de lucru, respectiv aerul din incinta de prelucrare.

În acest scop s-a utilizat un termometru numeric (digital) 93449/F cu o intrare. Acest tip de termometru poate fi utilizat pentru măsurarea temperaturii suprafețelor, a temperaturii aerului sau lichidelor, orificiilor etc., cu valori cuprinse în intervalul  $-50^{\circ}\text{C} \dots +1300^{\circ}\text{C}$ .

Datorită faptului că termometrul nu este protejat împotriva umidității, utilizarea sa trebuie să se realizeze în condiții corespunzătoare.

Pentru măsurarea temperaturii la suprafața obiectului de prelucrat și a obiectului de transfer, înainte și după prelucrare, s-a utilizat sonda de suprafață, perpendiculară pe suprafața de măsurare și conectată la termometrul digital.

Măsurarea temperaturii obiectului de prelucrat s-a realizat cu ajutorul sondei cu fir flexibil, care să permită contactul cu obiectul de prelucrat cât mai aproape de zona prelucrării.

Se obține afișarea instantanee a temperaturii cu posibilități de memorare a valorilor maxime și a oricăror valori momentane.

Temperatura mediului de lucru s-a măsurat cu ajutorul termometrului cu mercur.

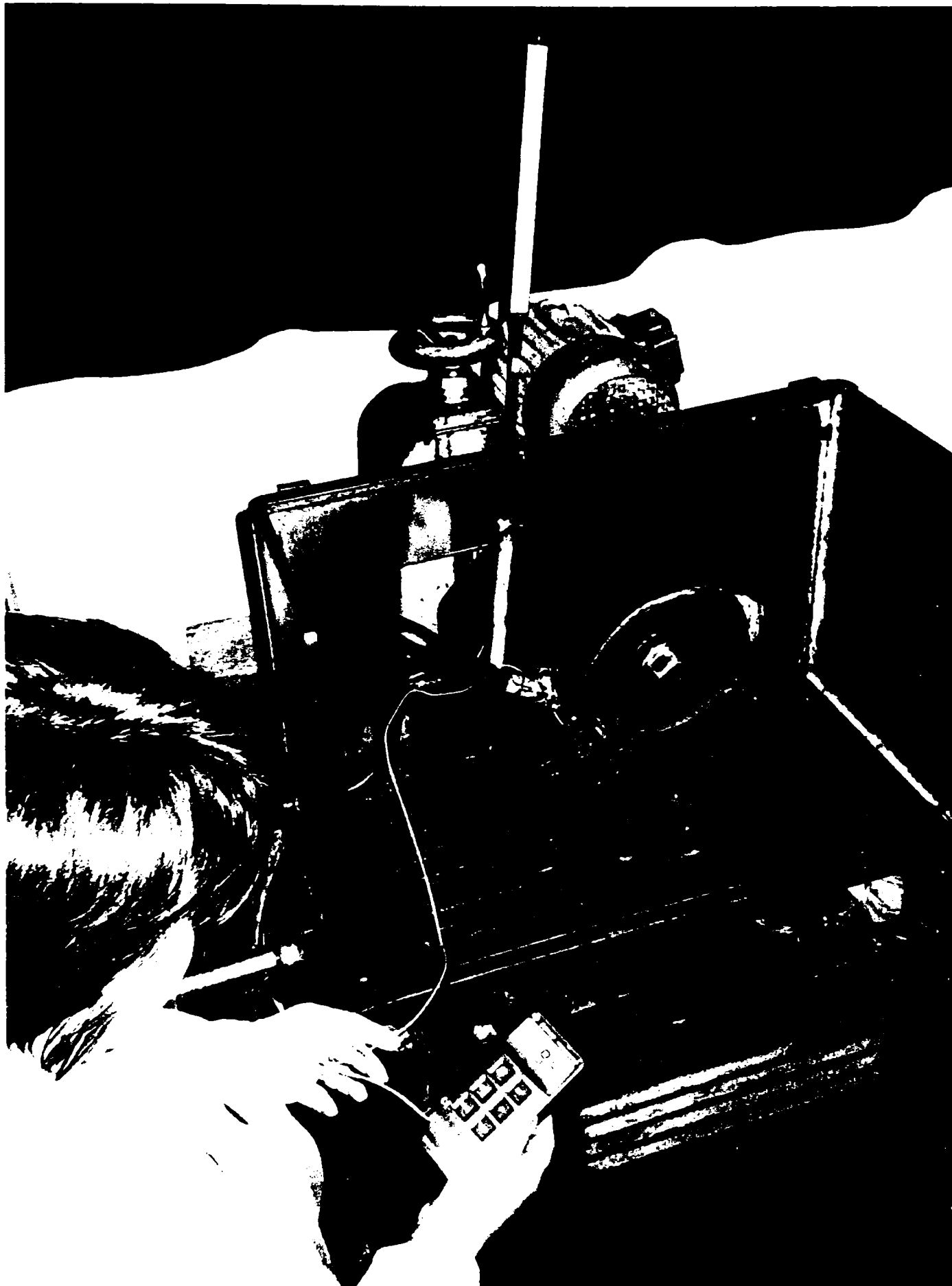


Fig. 6.5. Măsurarea temperaturii obiectului de prelucrat în timpul prelucrării prin eroziune complexă



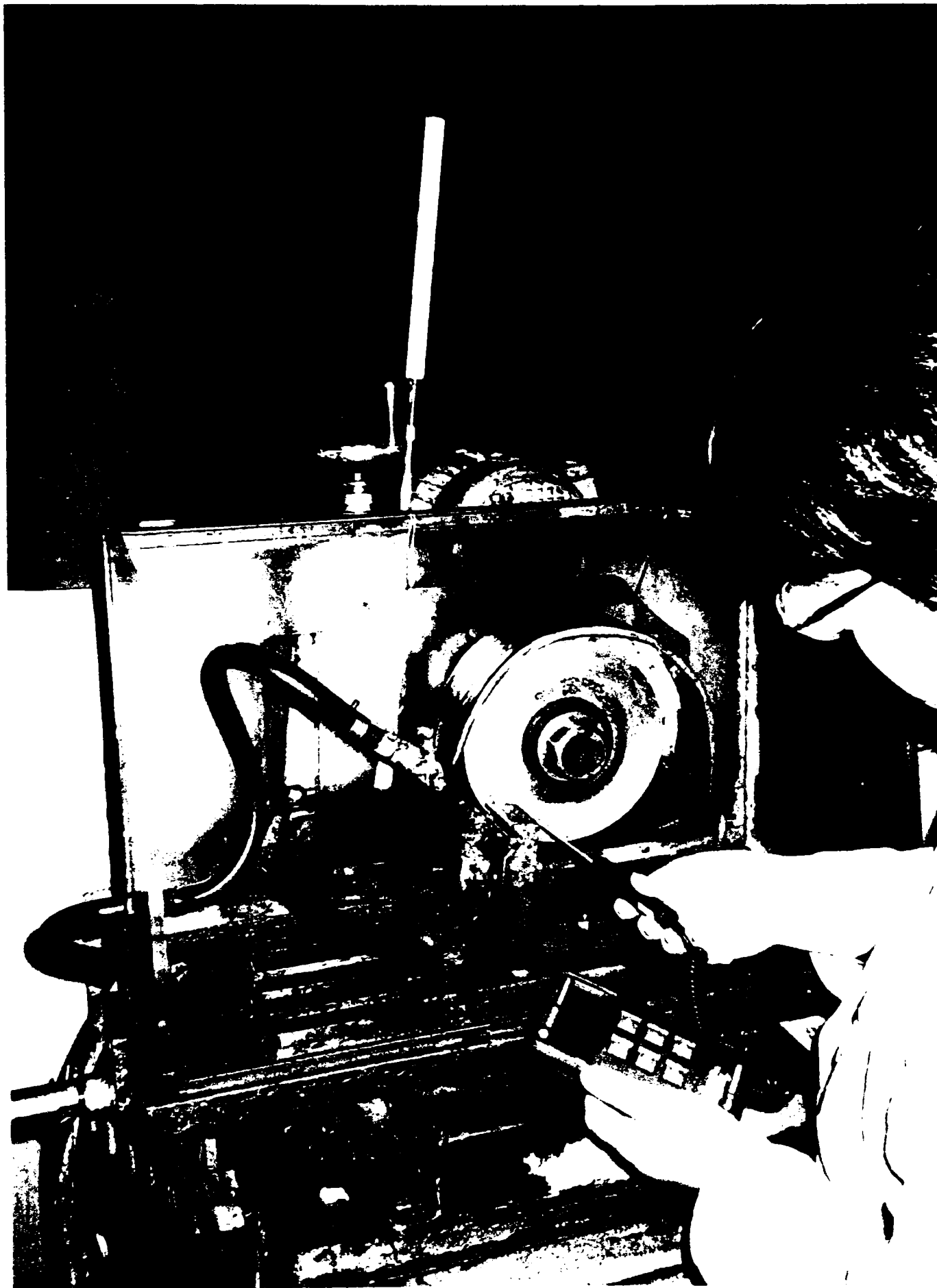


Fig. 6.6. Măsurarea temperaturii obiectului de transfer  
în timpul prelucrării prin eroziune complexă

### 6.3.2. Valorile temperaturii în sistemul termodinamic primar

În tabelul 6.4 sunt înregistrate valorile temperaturii pentru obiectul de prelucrat, obiectul de transfer și mediul de lucru în momentul  $\tau_0$ , înaintea începerii prelucrării, în momentele  $\tau_i$  din timpul prelucrării și în momentul final  $\tau_f$ , când procesul de eroziune a încetat. Temperatura mediului ambiant s-a menținut constantă pe întreaga durată a măsurărilor ( $t_{amb} = 18,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Însușind timpii  $\tau_i$  se constată că durata prelucrării a fost de 78 s, perioadă în care temperatura obiectului de prelucrat, a obiectului de transfer și a mediului de lucru a variat (conform datelor din tabel), ca și în graficul din figura 6.7. Aceste date se vor compara cu datele rezultate din studiul câmpului termic cu metoda elementului finit (capitolul 7).

Este necesară precizarea că răcirea în microsistemul obiect de prelucrat și în obiectul de transfer este în regim forțat datorită introducerii în sistem a mediului de lucru sub formă de jet.

Pentru a verifica comportarea obiectului de prelucrat în cazul răcirii libere (în afara sistemului de lucru deoarece acesta nu funcționează decât în prezența mediului de lucru), acesta a fost încălzit de la temperatura de  $20,2 \text{ }^\circ\text{C}$  la o temperatură de  $24,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , după care s-a cronometrat timpul în care obiectul de prelucrat a revenit la temperatura inițială ( $\tau = 128\text{s}$ ), mult mai mare decât la răcirea forțată. De altfel, datorită răcirii, la sfârșitul procesului de debitare, temperatura obiectului de prelucrat a revenit la cea inițială.

Tabelul 6.4

Parametri de ieșire

Nr. crt.	Timp [s]		Temperatura obiectului de prelucrat [ $^\circ\text{C}$ ]	Temperatura obiectului de transfer [ $^\circ\text{C}$ ]	Temperatura mediului de lucru [ $^\circ\text{C}$ ]	Observații
	Simbol	Valoare				
1.	$\tau_0$	0	19,1	21	20	
2.	$\tau_1$	10	21,3	20,9	21	
3.	$\tau_2$	10	21,7	22,6	20	
4.	$\tau_3$	10	22,3	23,2	22,5	
5.	$\tau_4$	5	20,4	25,7	22	
6.	$\tau_5$	5	28,7	26,9	22,7	
7.	$\tau_6$	5	34,4	28,9	23,1	
8.	$\tau_7$	5	26,9	27,4	22,3	
9.	$\tau_8$	10	23,3	27,8	21,7	
10.	$\tau_9$	10	22,4	26,3	22,1	
11.	$\tau_{10}$	8	23,6	24,5	21,4	
12.	$\tau_f$	10	21,5	22,3	22	

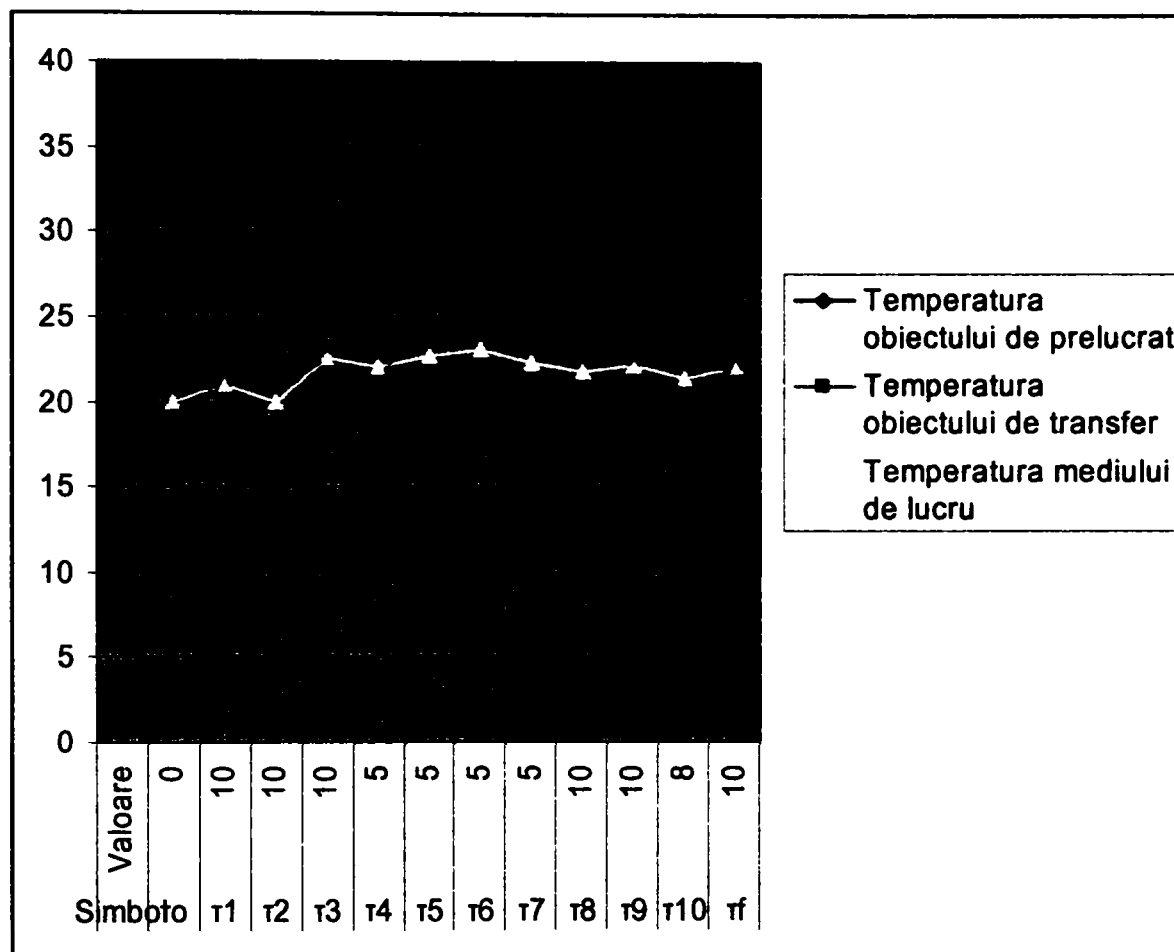


Fig. 6.7. Variația temperaturii în sistemul termodinamic primar la debitarea unui semifabricat bară

Analizând curbele din figura 6.7, se constată un vârf de temperatură a obiectului de prelucrat la jumătatea perioadei de debitare, ceea ce corespunde diametrului maxim al acestuia. O comportare asemănătoare are și temperatura obiectului de transfer dar la valori mai mici, iar curba de variație a temperaturii mediului de lucru este ușor aplatizată.

Prin urmare, este evident faptul că în timpul procesului de debitare prin eroziune complexă, cea mai mare cantitate de căldură este transferată obiectului de prelucrat.

## 7. MODELAREA CÂMPULUI TERMIC LA DEBITAREA PRIN EROZIUNE COMPLEXĂ UTILIZÂND METODA ELEMENTULUI FINIT

### 7.1. Structura sistemului termodinamic primar analizat

La prelucrarea prin eroziune complexă, conform ipotezelor emise în capitolul 3, fenomenele fundamentale se desfășoară în sistemul termodinamic primar. Acesta poate avea diverse structuri, printre care cele analizate în capitolul 5.4.1 și reprezentate schematic în figura 7.1.

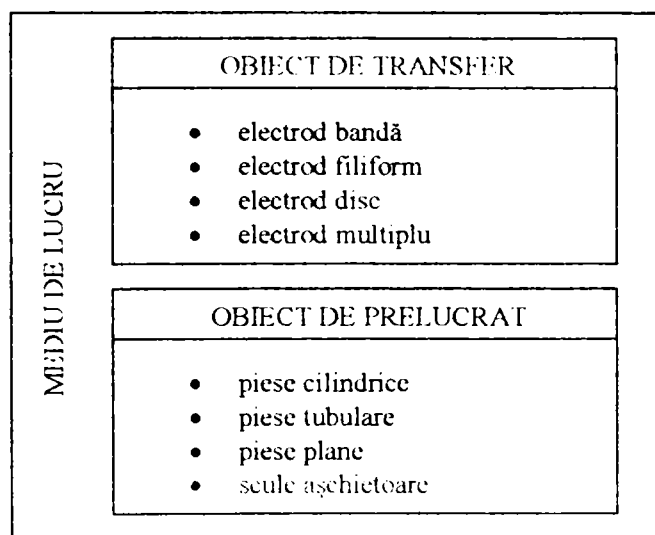


Fig. 7.1. Tipuri uzuale ale obiectului de prelucrat și ale obiectului de transfer

Pomind de la variantele pentru care s-au analizat în capitolele 5.4.1.2, 5.4.1.3 și 5.4.1.4 structura și câmpul termic, s-a ales pentru modelarea câmpului termic prin metoda elementului finit, structura analizată în capitolul 5.4.1.2 (a) și reprezentată în tabelul 5.1 (obiect de prelucrat cilindru fix – obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare).

În cazul particular ales spre analiză, modelarea câmpului termic urmărește trei aspecte semnificative în evoluția procesului de transfer termic:

- I. Evoluția câmpului termic, în secțiune plană, transversală, în cazul unei descărcări electrice în impuls singulare;
- II. Evoluția câmpului termic, în secțiune plană, transversală, în cazul a două descărcări electrice în impuls simultane;
- III. Evoluția spațială a câmpului termic în cazul unei descărcări electrice în impuls singulare.

## **7.2. Formularea metodei elementului finit la determinarea câmpului termic pentru debitarea prin eroziune complexă a unui obiect de prelucrat cilindru fix cu obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare**

### **7.2.1. Considerații generale**

În procesul de prelucrare prin eroziune complexă apare un regim termic nestaționar ceea ce implică dificultăți în aprecierea exactă a evoluției câmpului termic.

Metoda elementului finit, în acest caz, oferă posibilitatea determinării evoluției câmpului termic prin parcurgerea următoarelor etape:

- *studiul structurii* în vederea alegerii unui model de calcul și a tipurilor de elemente finite care să reproducă cât mai fidel starea energetică a componentelor analizate și să fie în concordanță cu rezultatele pe care dorim să le obținem;
- *discretizarea structurii* realizată în așa mod încât zonele de interes dimensiunile elementelor finite să fie cât mai mici și să nu prezinte distorsiuni;
- *studiul elementelor finite* în vederea construirii ecuațiilor elementelor finite, numite ecuații elementale;
- *transformarea matricelor* elementelor din sistemul de coordonate local în sistemul de coordonate global al structurii;
- *asamblarea ecuațiilor elementale* în sistemul de ecuații atașat structurii sau asamblarea elementelor finite;
- *rezolvarea sistemului de ecuații*, printr-un procedeu numeric cunoscut, determinându-se necunoscutele principale;
- *calculul necunoscutelor secundare*.

Programele moderne de analiză cu elemente finite realizează o prelucrare superioară a mărimilor ce caracterizează distribuția temperaturii în structura analizată.

### **7.2.2. Condiții inițiale**

Datorită complexității fenomenelor studiate și a regimului nestaționar de propagare a căldurii, în vederea modelării cu ajutorul elementului finit, este necesar să se impună o serie de condiții restrictive pentru sistemul termodinamic analizat (microsistemul obiect de prelucrat), condiții care definesc atât sistemul tehnologic de lucru cât și procesele fundamentale. Acestea sunt enunțate în tabelul 7.1.

Tabelul 7.1

## Condiții inițiale pentru modelare

Nr. Crt.	Condiția inițială de frontieră		Observații
	Denumire	Definire	
1.	Frontiera sistemului termodinamic	Microsistemul obiect de prelucrat	
2.	Modul de spălare a zonei de prelucrare	Jet	
3.	Căldura transmisă	Excusiv căldura rezultată la descărcarea electrică în impuls, ca urmare a efectului Joule-Lenz	Se neglijează interacțiunea mecanică dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer
4.	Temperatura mediului ambiant	$t_a = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (293 K)	Modelarea se realizează cu o temperatură etalon care permite studiul comparativ, la alte valori ale temperaturii mediului ambiant
5.	Temperatura inițială a obiectului de prelucrat și a obiectului de transfer	$t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (293 K)	
6.	Temperatura în zona de prelucrare, în momentul descărcării	a) 10293 K b) 15293 K c) 20293 K (valorile impuse teoretic din teoria descărcărilor electrice în impuls nestaționar)	Pentru realizarea unui studiu comparativ
7.	Obiect de prelucrat		Tabelul 6.2
8.	Obiect de transfer		Tabelul 6.2
9.	Mediul de lucru		Tabelul 6.3

### 7.2.3. Modelarea câmpului termic la debitarea prin eroziune complexă, în secțiune plană transversală, pentru o descărcare singulară

În vederea determinării câmpului termic în *microsistemul obiect de prelucrat*, la debitarea prin eroziune complexă a unui cilindru de diametru  $\Phi = 20$  mm și lungimea finită  $L = 20$  mm (fig. 7.2), se realizează discretizarea prin elemente finite triunghiulare (triang) din biblioteca de elemente finite a programului COSMOS/M 2.5 (10836 elemente finite și 5638 noduri).

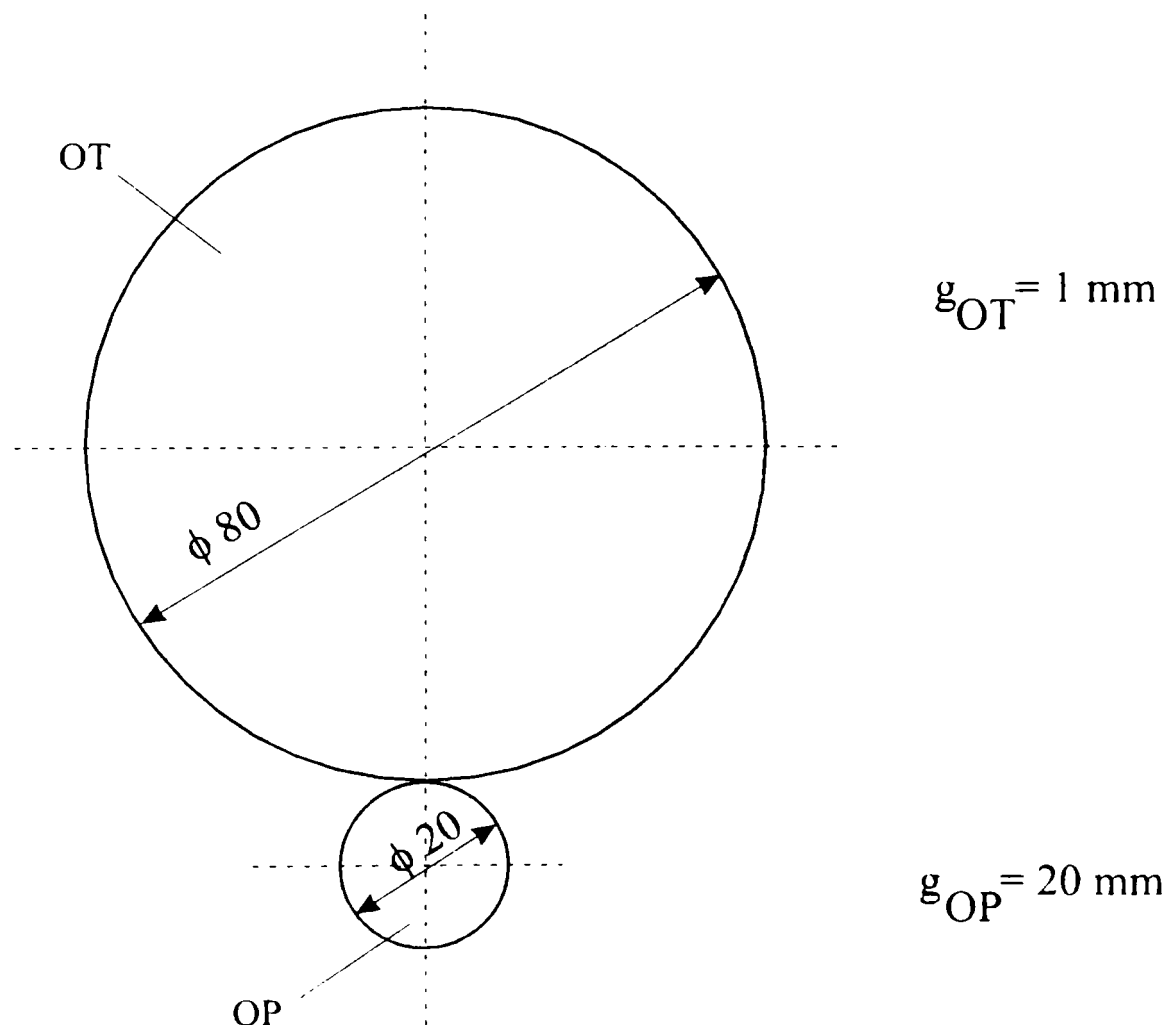


Figura 7.2. Structura de discretizare — varianta I

Se realizează o analiză a distribuției câmpului termic în regim nestaționar pentru diferite stări ale acestuia.

- Descărcare singulară, pentru regimuri de răcire diferite
- Descărcare singulară, pentru un regim de răcire moderat

Fișierul de comenzi pentru cazul producerii unei descărcări electrice în impuls singulare este de tip text.ses (Anexa 1), iar datele de ieșire sunt cuprinse în fișierele cu extensia OUTPUT.

Structura reprezentată în figura 7.2 este discretizată într-o rețea de 5368 noduri și 10836 elemente finite triunghiulare, conform reprezentării din figura 7.3.

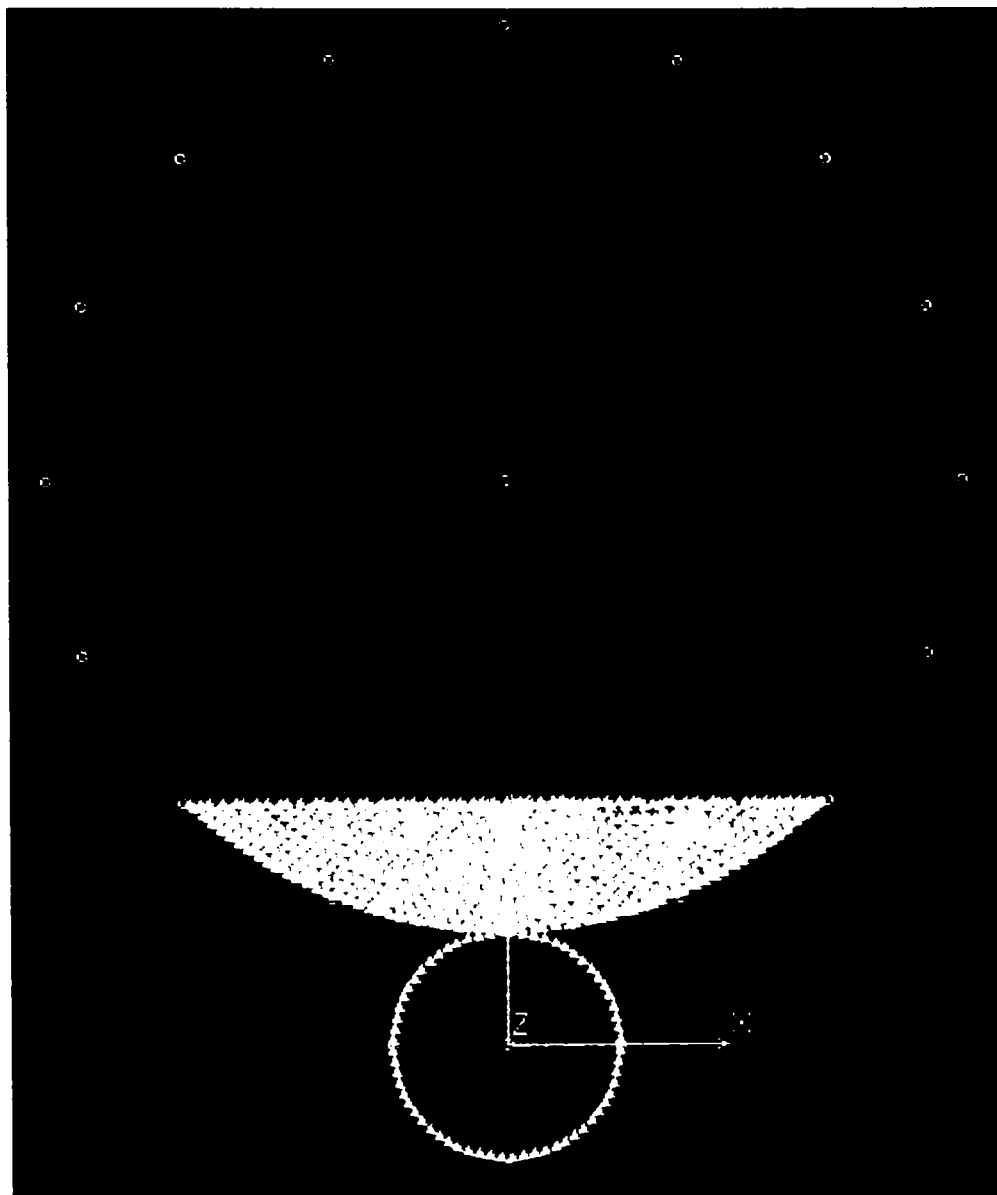


Fig. 7.3. Rețeaua de discretizare I

În rețea sunt marcate suprafețele de schimb de căldură cu mediul exterior (mediul de lucru și aerul atmosferic) prin convecție și radiație, iar pentru o mai bună evidențiere a acestora s-a realizat detaliul din figura 7.4.

Impunând pe contur schimb de căldură forțat și liber, s-au realizat reprezentările din figurile 7.5 și 7.6, iar analizând distribuția câmpului termic în cele două cazuri, respectiv diferențele între valorile temperaturilor în noduri similare din linia mediană a rețelei, se constată că regimul de răcire influențează doar gradientul de temperatură, nu și forma câmpului, deci nu este modificată semnificativ această distribuție.



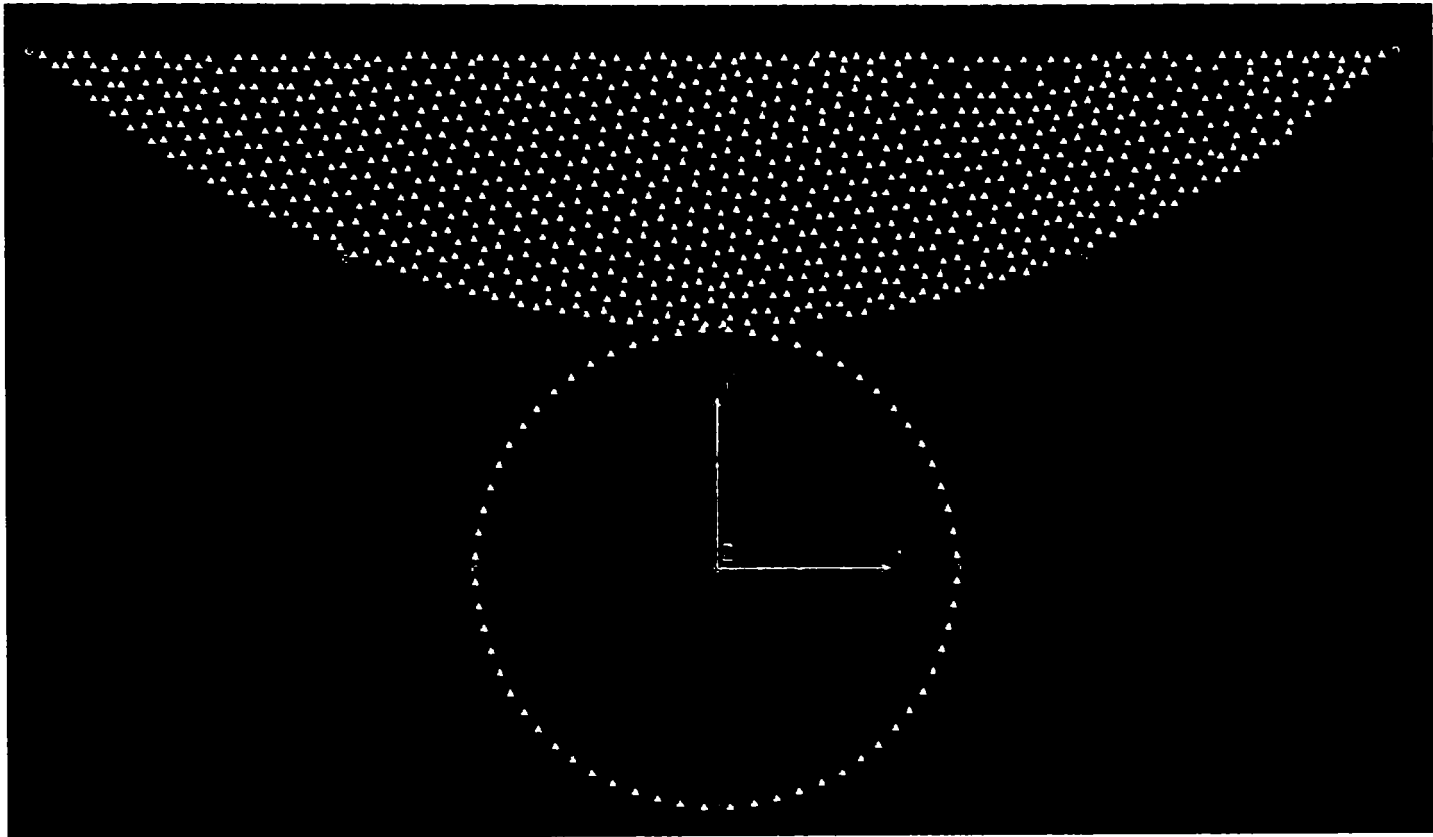


Fig.7.4. Rețeaua de discretizare I — detaliu

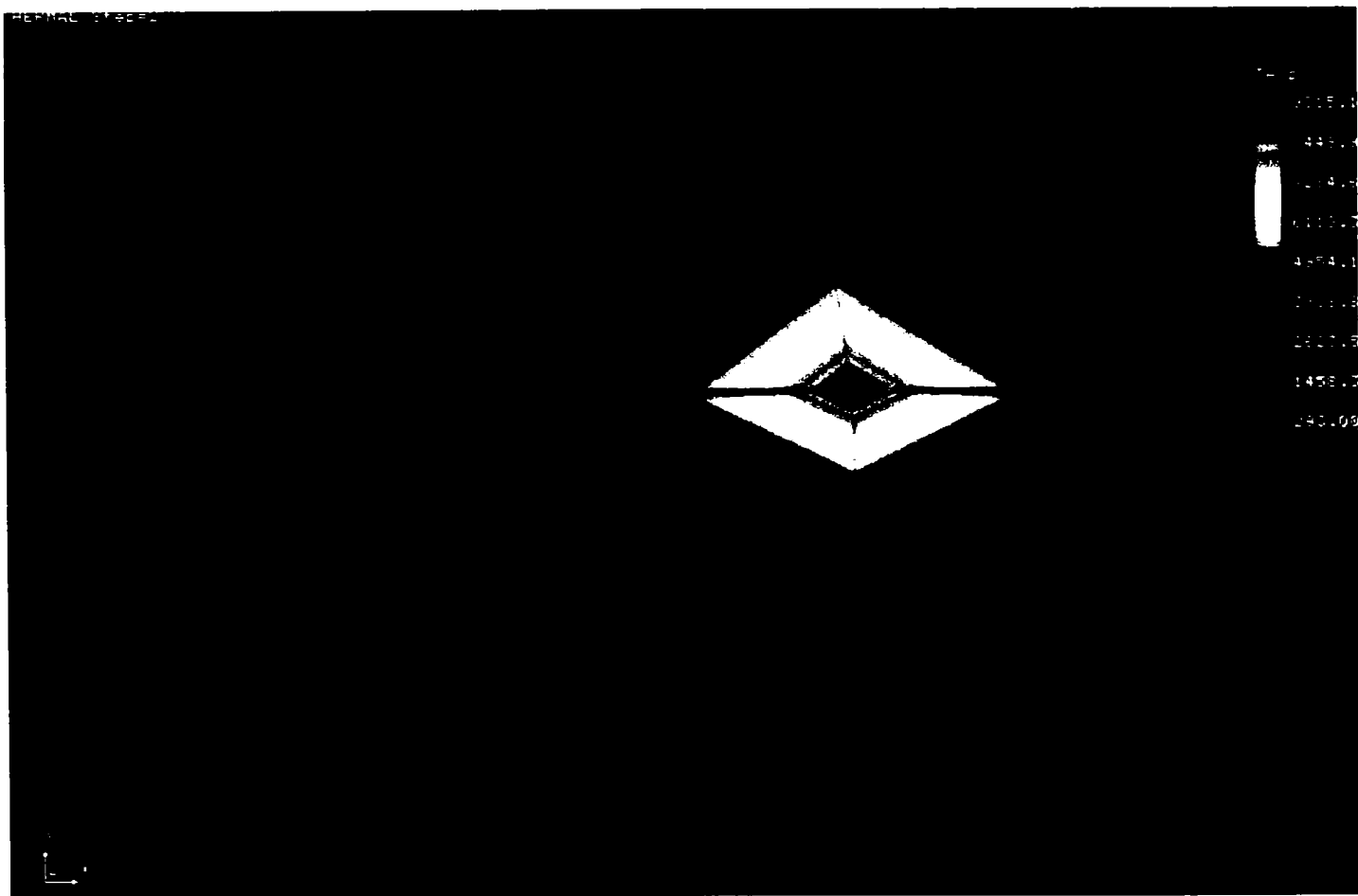


Fig. 7.5. Distribuția câmpului termic la o descărcare singulară, cu regim de răcire forțat

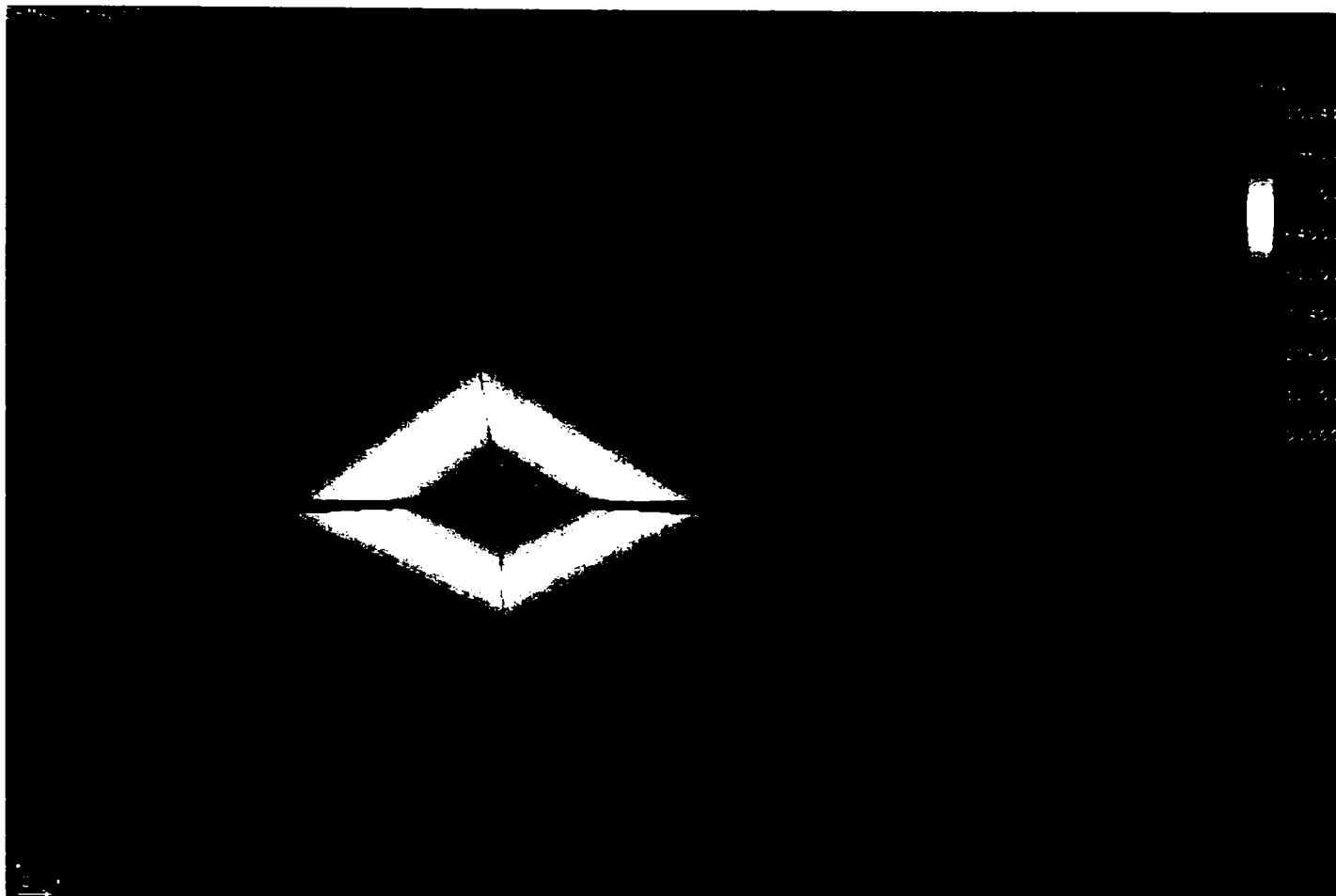


Fig. 7.6. Distribuția câmpului termic la o descărcare singulară, cu regim de răcire liber

Pentru a urmări distribuția câmpului termic în microsistemul obiect de prelucrat, la o temperatură medie în zona de prelucrare (15293 K), calculul s-a realizat pe durata  $10^{-3}$  s a unei descărcări electrice în impuls singulare, considerând 100 de pași succesivi care acoperă întreg domeniul.

Datele de ieșire sunt cuprinse în fișierele cu extensia „out” iar reprezentările distribuției câmpului termic în primii zece din cei 100 pași sunt reprezentate în figurile 7.7 ÷ 7.26.

Centralizarea valorilor temperaturilor în care efectul conducției este sesizabil, în acești primi zece pași, sunt reprezentate în tabelul 7.2 iar în baza acestuia s-au trasat graficele 7.27 ÷ 7.32. Acestea exprimă evoluția temperaturii în următoarele noduri:

- nodul 33, corespunzător punctului de contact dintre obiectul de transfer ( $M'$ ) și obiectul de prelucrat ( $M$ ) — punctul  $M$  coincide cu punctul  $M'$ , conform tabelului 5.1;
- nodul 5360, primul nod pe linia mediană din vecinătatea celui de contact;
- nodul 5509, al doilea nod pe linia mediană;
- nodurile 5309 și 5311, nodurile laterale, simetrice față de nodul 33;
- nodurile 5359 și 5379, nodurile laterale, simetrice față de nodul 5509.

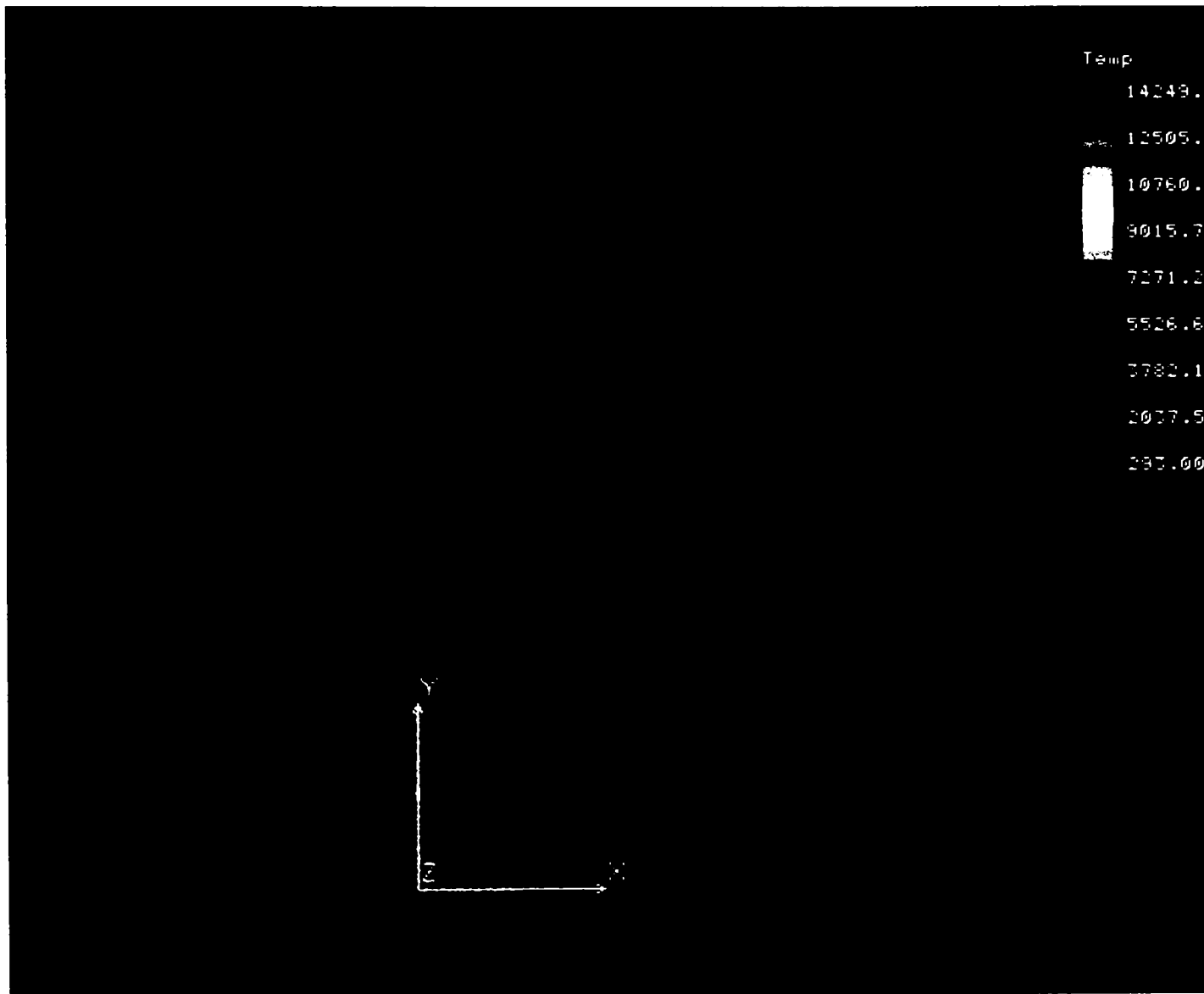


Fig.7.7. Distribuția câmpului termic, pasul 1 — ansamblu general

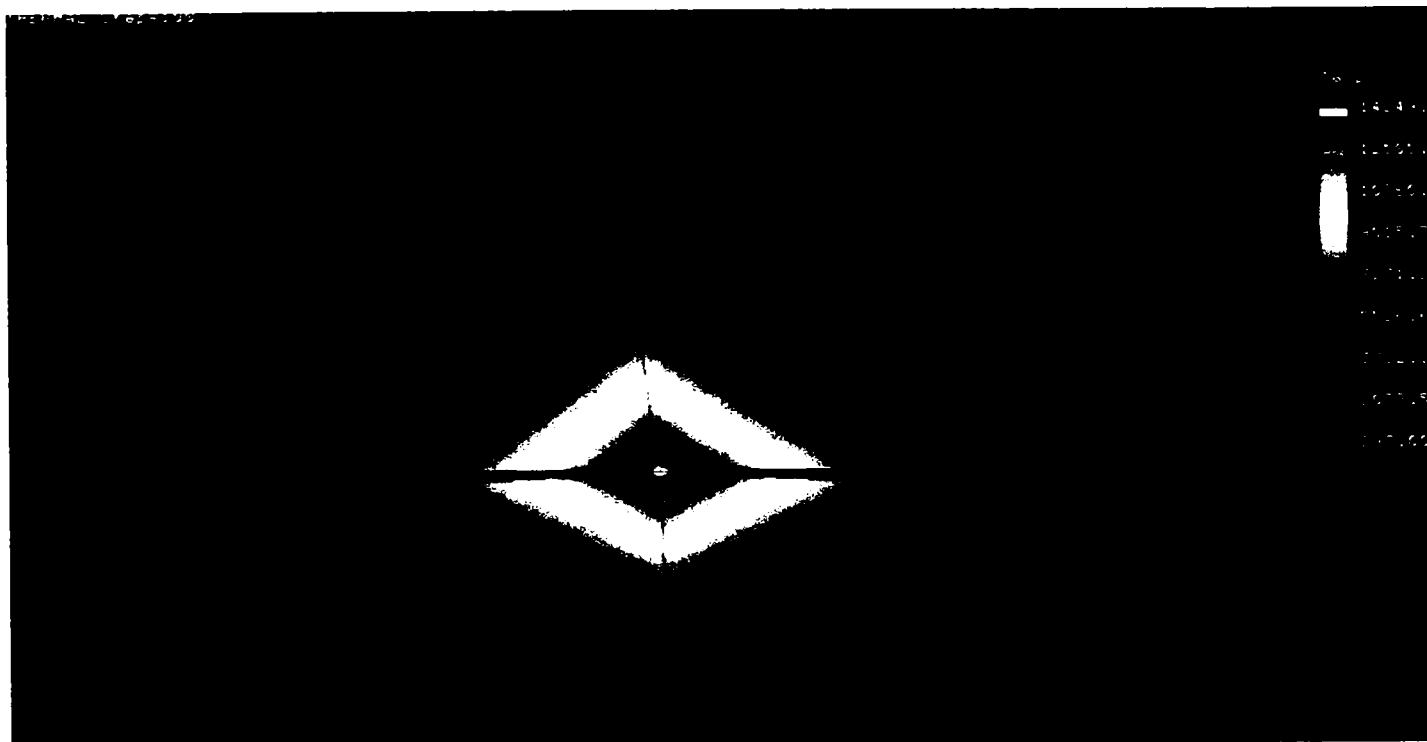


Fig.7.8. Distribuția câmpului termic, pasul 1 — detaliu

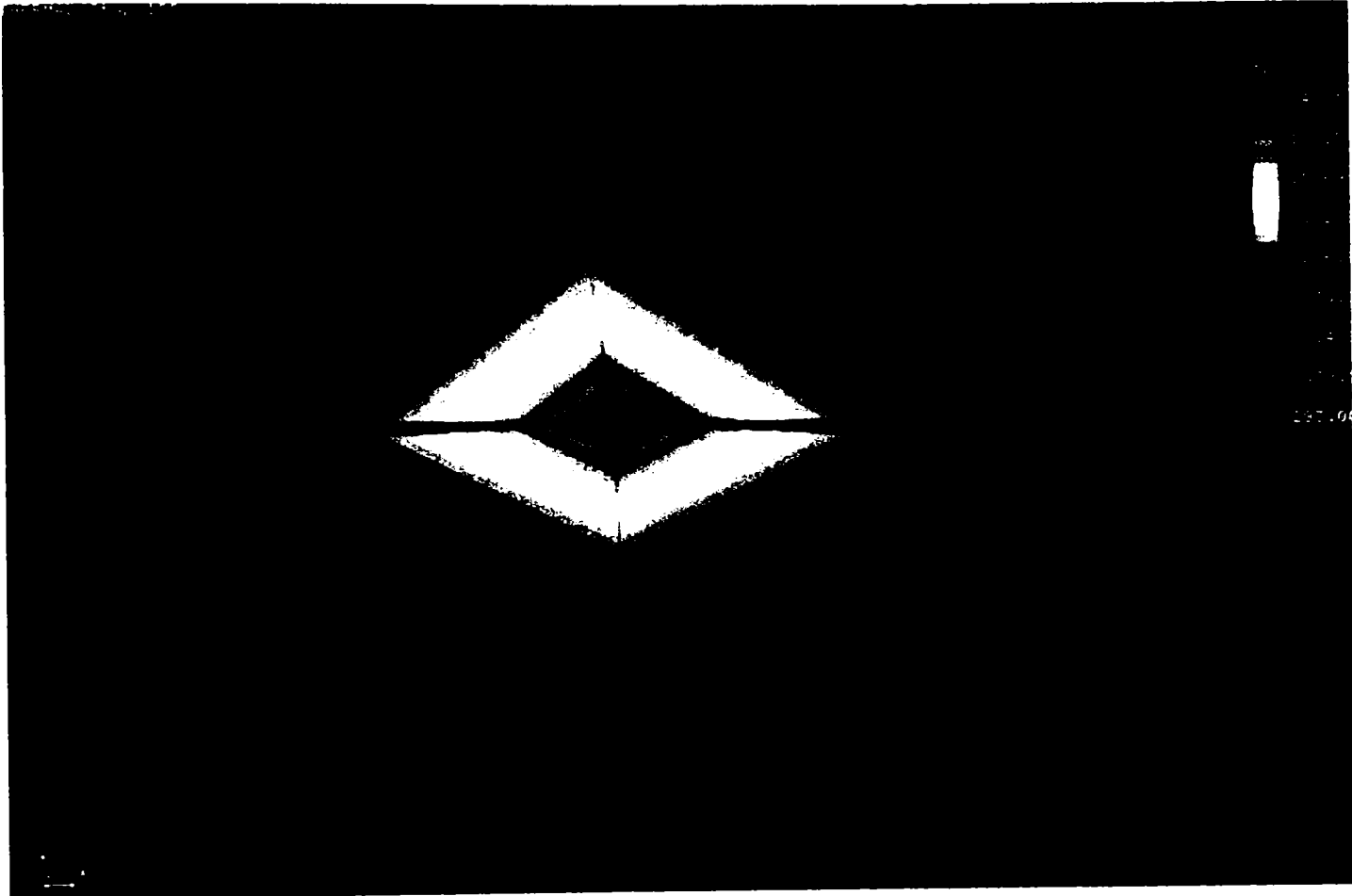


Fig.7.9. Distribuția câmpului termic, pasul 2 — detaliu

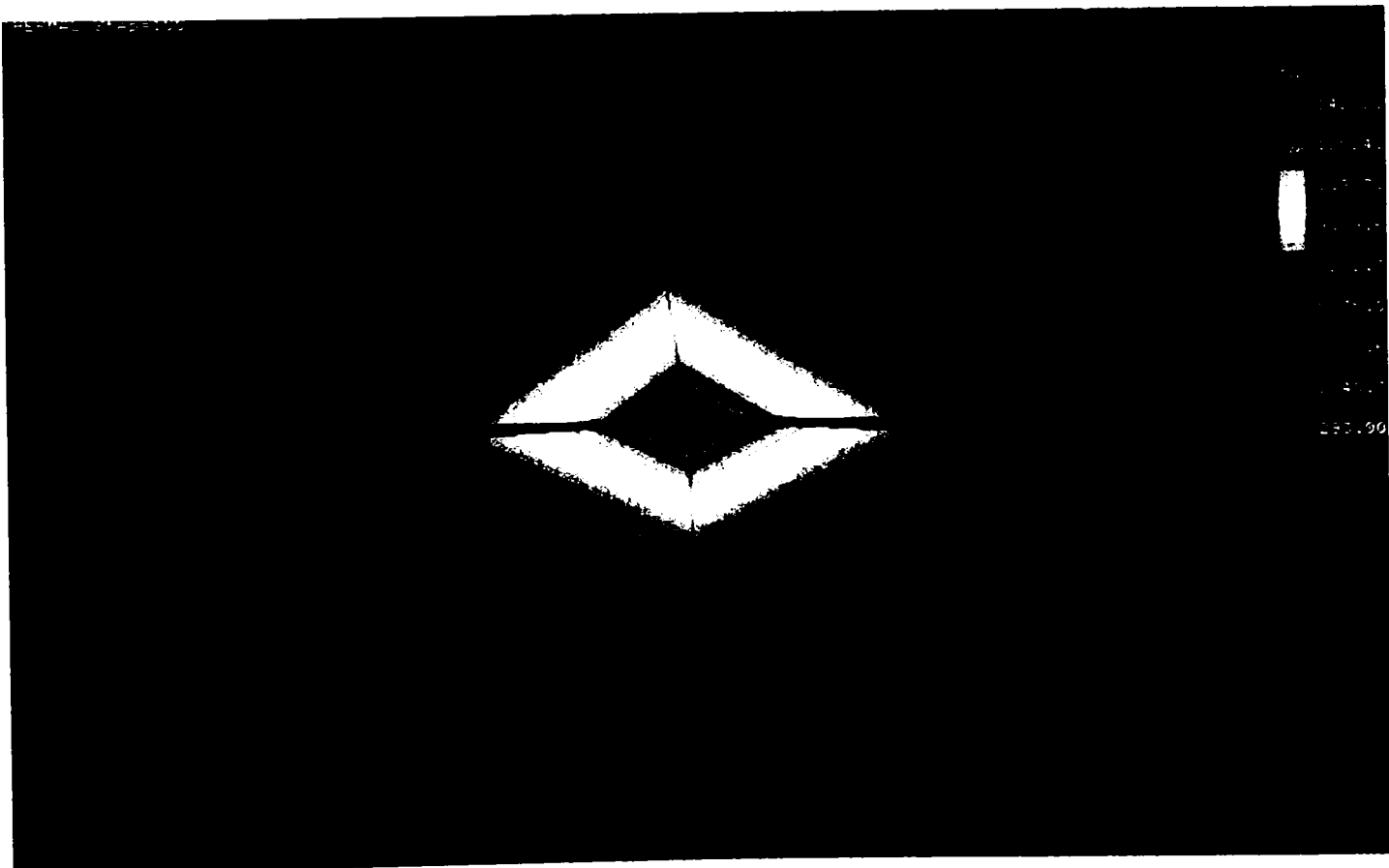


Fig.7.10. Distribuția câmpului termic, pasul 3 — detaliu

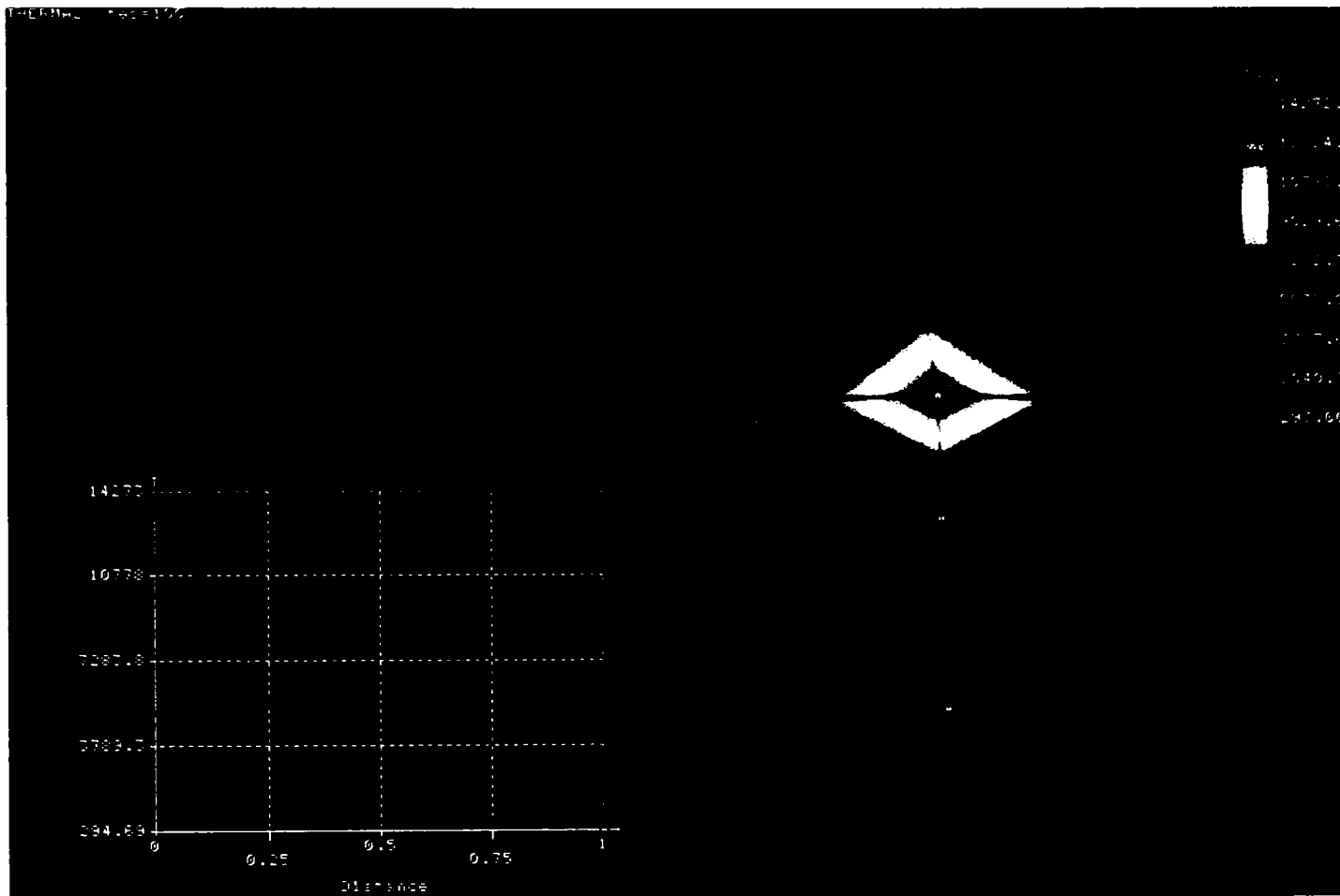


Fig.7.11. Distribuția câmpului termic, pasul 3 — grafic de temperatură în noduri mediane

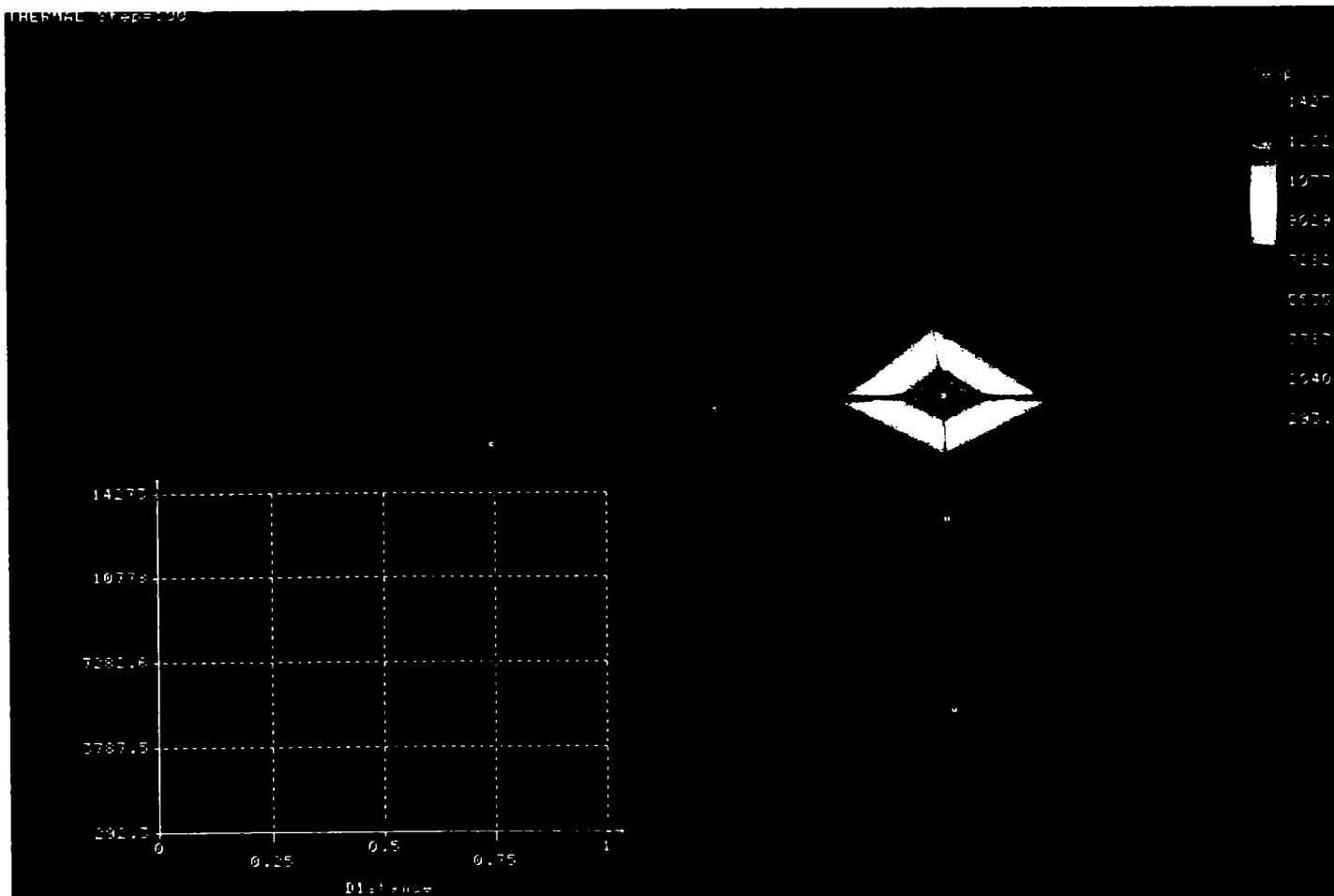


Fig.7.12. Distribuția câmpului termic, pasul 3 — grafic de temperatură în noduri de contur

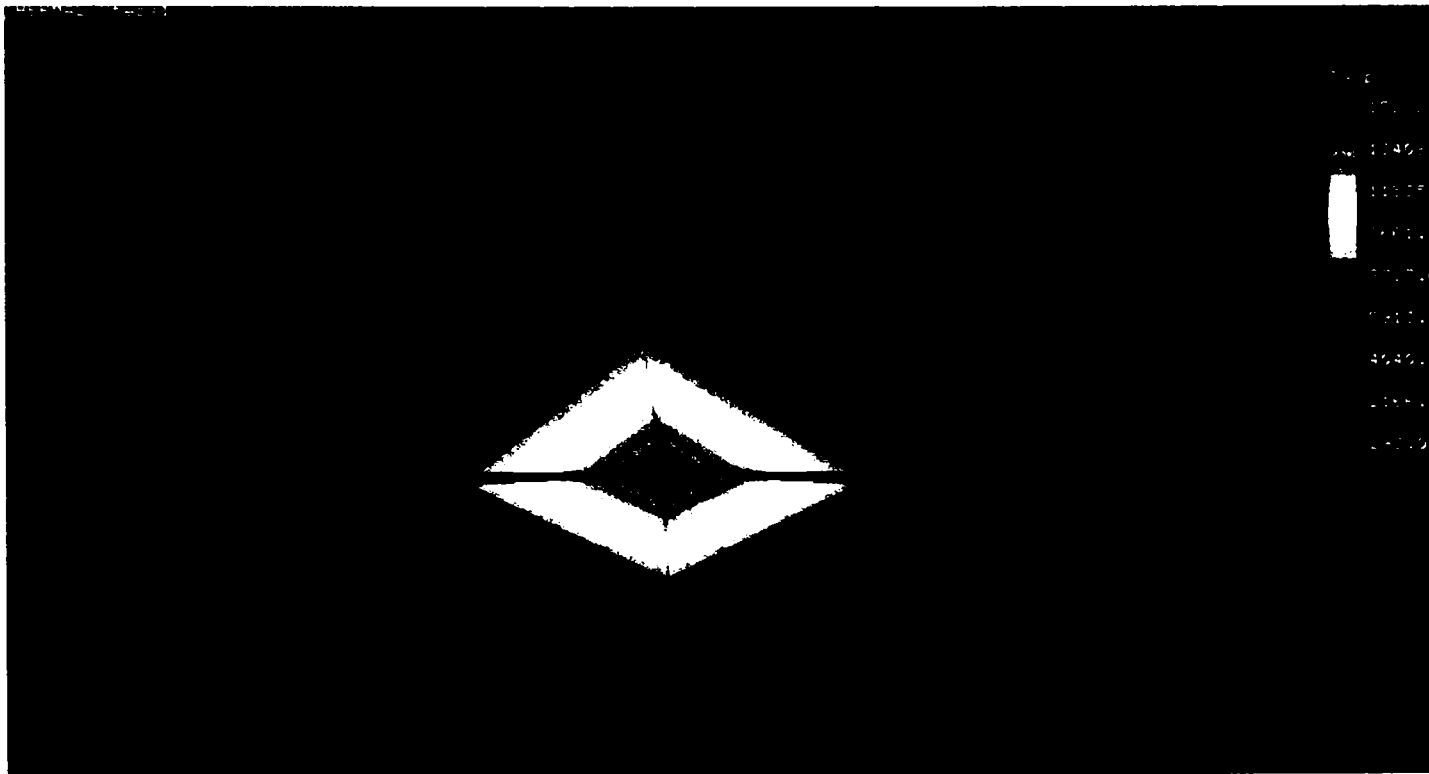


Fig.7.13. Distribuția câmpului termic, pasul 4 — detaliu

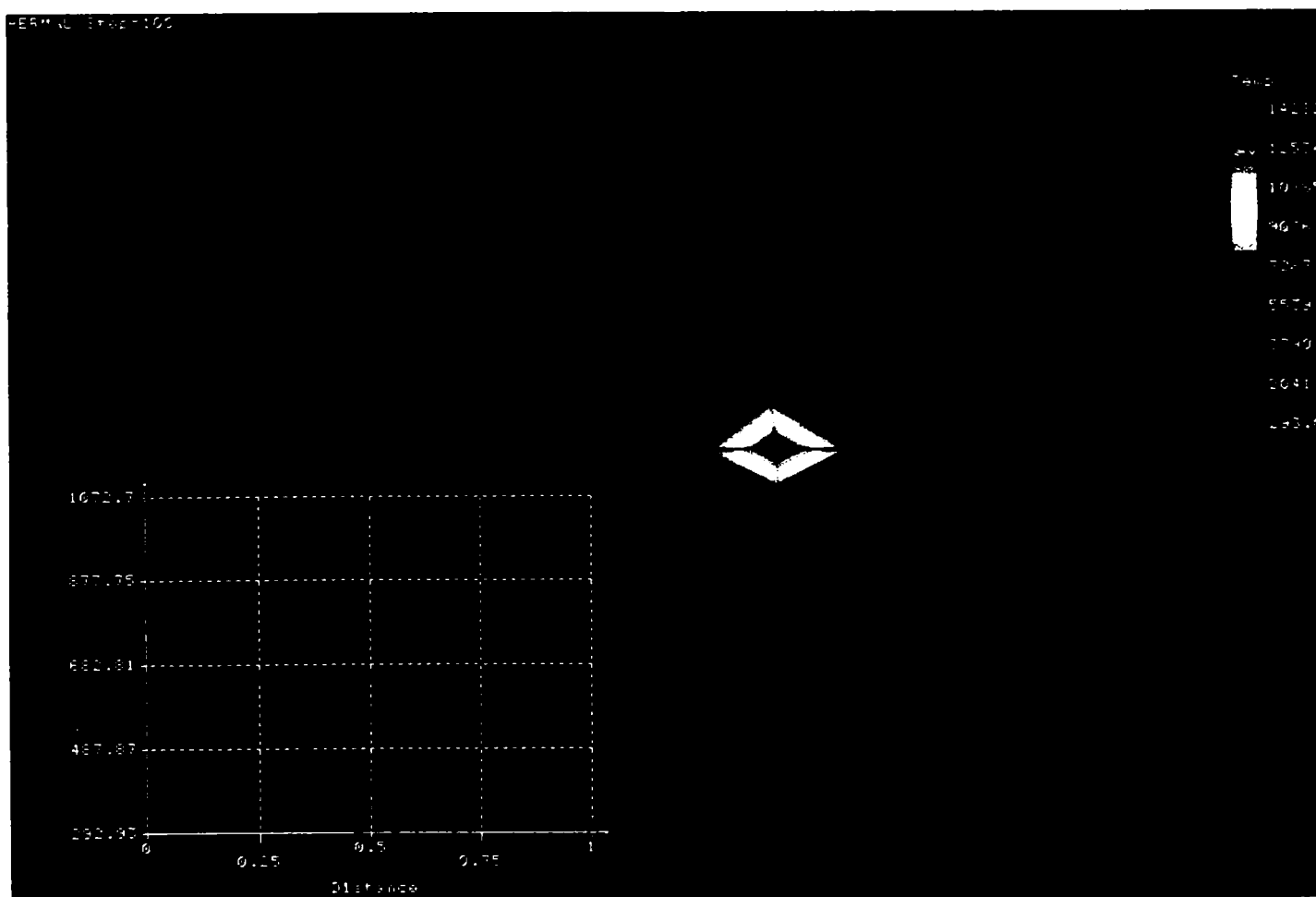


Fig.7.14. Distribuția câmpului termic, pasul 4 — grafic de temperatură în noduri mediane

#### 7.2.4. Modelarea câmpului termic la debitarea prin eroziune complexă, în secțiune plană transversală, pentru două descărcări simultane

Folosind discretizarea prin elemente finite triunghiulare din biblioteca de elemente finite a programului COSMOS/M versiunea 2.5, se studiază, în secțiune plană transversală, evoluția câmpului termic în obiectul de prelucrat (figura 7.39), la o cotă de avans  $h_i$ .

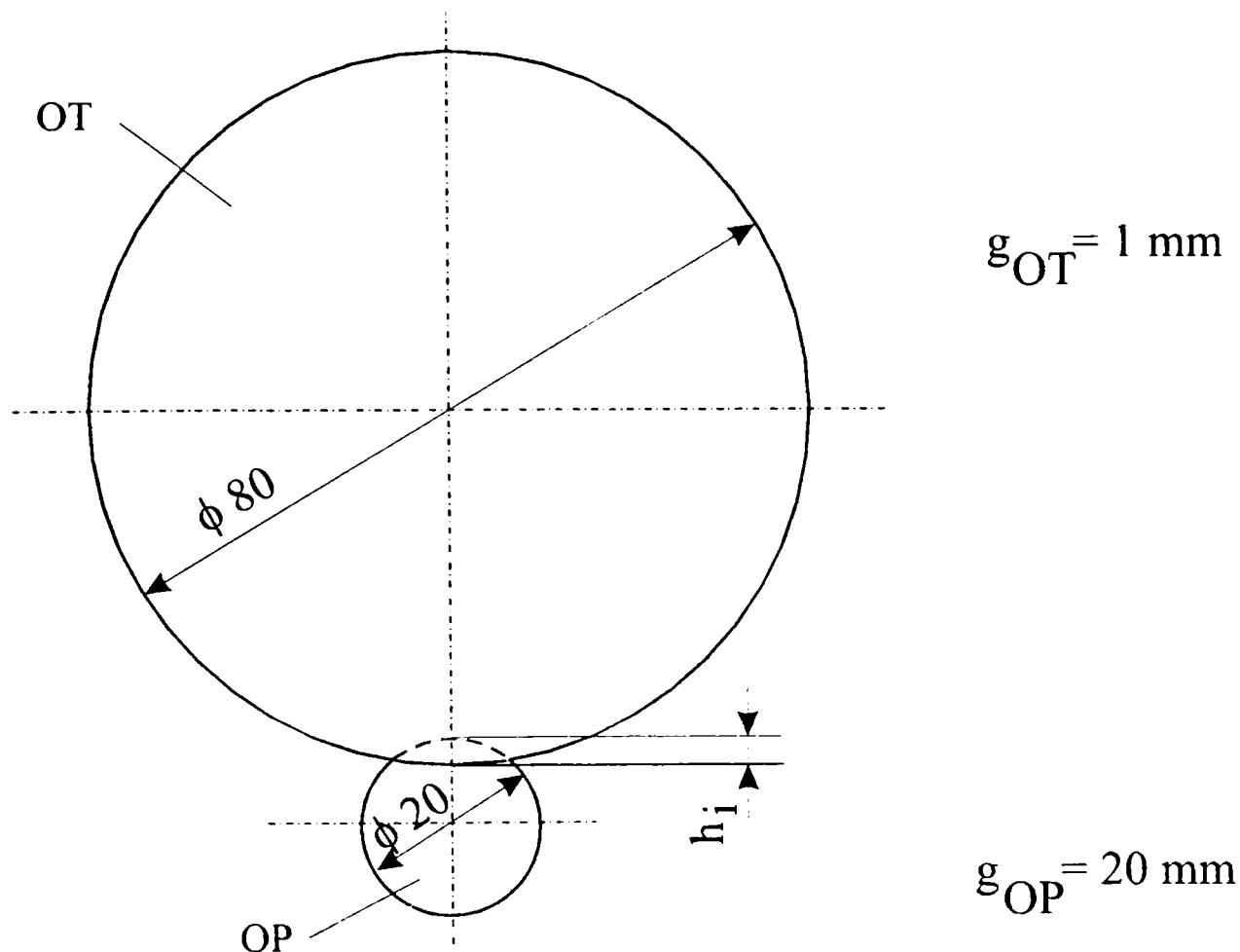


Figura 7.39. Structura de discretizare — varianta II

În figurile 7.40 și 7.41 este reprezentat câmpul termic pentru două descărcări simultane și o cotă de avans de 4 mm. Se constată distribuția căldurii cu un gradient de temperatură mult mai mare, comparativ cu evoluția în cazul descărcării singulare și de altă formă.

Din figurile 7.42 și 7.43 se constată că mărimea câmpului termic nu este influențată de adâncimea de pătrundere, fiind însă necesară mențiunea că, în acest caz, nu s-a ținut cont de starea termică reală în momentul acestor descărcări.

### 7.2.5. Modelarea câmpului termic la debitarea prin eroziune complexă, în reprezentare spațială, pentru o descărcare singulară

Pentru determinarea câmpului termic printr-o reprezentare spațială a structurii din figura 7.45 se realizează discretizarea prin 68495 de elemente finite tetraedice din biblioteca de elemente finite a programului COSMOS/M 2.5 și 18031 de noduri (figura 7.46).

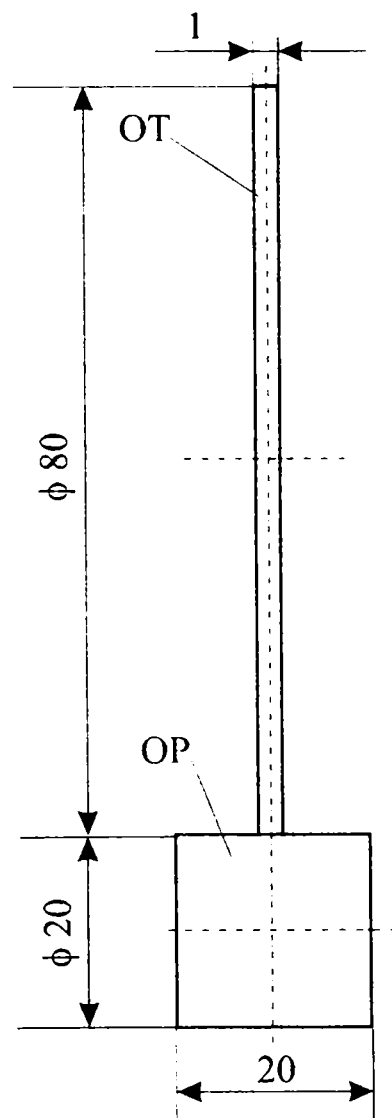


Figura 7.45. Structura de discretizare -- varianta III



prelucrat și a căldurii transmise prin interacțiunea acestuia cu celelalte micro sisteme (inclusiv pierderi de căldură), sunt centralizate în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3

Estimarea procentuală a distribuției căldurii dezvoltate în sistemul termodinamic primar

Varianta de studiu	Temperatura în zona descărcării electrice în impuls [K]	Temperatura inițială distribuită în obiectul de prelucrat [K]	Căldura transmisă în obiectul de prelucrat [%]	Căldura transmisă din micro sistemul obiect de prelucrat [%]	Observații
Descărcare electrică în impuls singulară și răcire liberă	10293	10241	99,49	0,51	
Descărcare electrică în impuls singulară și răcire forțată	10293	9615	93,41	6,59	
	15293	14249	93,17	6,73	
	20293	18937	93,31	6,69	
Două descărcări electrice în impuls simultane	15293	14944	97,71	2,29	Valorile corespund uneia din cele două descărcări

Observăm din tabel că, indiferent de varianta energetică de prelucrare, cea mai mare cantitate de căldură este distribuită obiectului de prelucrat, valoarea maximă transmisă în exteriorul acestuia fiind de aproximativ 7 % din totalul căldurii dezvoltate în sistem la descărcările electrice în impuls. Prin urmare, cercetările ulterioare trebuie să fie orientate înspre căldura înmagazinată în micro sistemul obiect de prelucrat. Se remarcă însă faptul că, în cazul răcirii libere, respectiv la prelucrarea cu două descărcări electrice în impuls simultane, căldura transmisă în exteriorul micro sistemului obiect de prelucrat are valori mult mai mari decât la o descărcare singulară și răcire forțată, deci se pot afirma următoarele consecințe:

- în procesul tehnologic de fabricație a obiectului de transfer este necesar să se introducă o operație de planare, lucru de altfel favorabil creșterii preciziei de prelucrare, respectiv scăderii lățimii tăieturii;
- alegerea debitului lichidului de lucru, a formei și modului de dirijare a jetului, astfel încât să fie favorizată răcirea liberă.

b) *Evoluția câmpului termic, cvasiidentică din punct de vedere al formei și diferit cu distribuția a temperaturii*

Conform tabelului 7.3, pentru orice regim de prelucrare folosit, pierderile de căldură sunt practic echivalente, iar forma câmpului termic este cvasiidentică. Apar însă diferențe în ceea ce privește distribuția valorilor temperaturii, evoluția câmpului realizându-se cu gradienti mai mari la regimuri de prelucrare dure și cu gradienti mai mici la regimuri de prelucrare ușoare.

Prin urmare, regimul de prelucrare nu trebuie ales din considerente de pierderi energetice, ci exclusiv în funcție de precizia impusă prelucrării și calitatea suprafețelor prelucrate.

c) *Evoluția spațială a câmpului termic*

Studiul câmpului termic, în varianta tehnologică aleasă, la o singură descărcare electrică în impuls, confirmă ipoteza emisă în capitolul 5, *forma de picătură*, caz în care căldura este concentrată în obiectul de prelucrat. Se pot aprecia astfel ca fiind valabile ipotezele emise referitor la forma câmpului și pentru celelalte variante de prelucrare și cum, din punct de vedere energetic varianta optimă este cu forma picătură, se propunea alegerea sa, cu prioritate, ori de câte ori acest lucru este posibil (obiect de prelucrat în mișcare de avans de prelucrare transversal/obiect de transfer în mișcare de avans vertical și longitudinal de poziționare).

d) *Dependența câmpului termic de numărul descărcărilor simultane*

S-a studiat câmpul termic în cazul unei descărcări electrice în impuls singulare și în cazul a două descărcări simultane. În condițiile în care numărul elementelor finite, obținute la discretizare, este aproximativ același în ambele cazuri, se constată că, la o singură descărcare, câmpul termic este prezent în structura unui singur element finit, iar la două descărcări simultane, câmpul termic cuprinde trei elemente finite pentru una din descărcări.

Se impune astfel canalizarea unor cercetări ulterioare pentru găsirea soluțiilor tehnologice care să favorizeze apariția simultană a mai multor descărcări.

Putem influența în acest fel creșterea ale productivității prelucrării cu aproximativ 300 %, în condițiile ideale în care s-ar produce, pe toată durata prelucrării exclusiv câte două descărcări simultane.

e) *Dimensiunea craterului*

Din studiul câmpului termic la o descărcare, cunoscând dimensiunile unui element finit, se poate determina valoarea, atât a diametrului craterului, cât și a adâncimii sale.

În situația analizată (figura 7.36) diametrul craterului este de 2,04 mm iar adâncimea sa de 0,88 mm, ceea ce confirmă estimările ca urmare a determinărilor experimentale anterioare acestui studiu. Se crează premisele favorabile stabilirii unei relații directe între parametrii de stare ai suprafețelor și parametrii de proces.

## 8. CONCLUZII

Prelucrarea dimensională prin eroziune complexă este un domeniu tehnologic mereu actual ce lasă în permanență câte o ușă deschisă încercărilor de a-i cunoaște cât mai bine tainele. Este un domeniu cu care școala politehnică timișoreană se mândrește și de aceea, orice pătrundere pe acest tărâm impune rigurozitate, temeinicie în aprofundarea realizărilor și abordarea noului. Pentru oricine încearcă acest lucru este o datorie de onoare să păstreze ștacheta la cotele unde a fost ridicată.

Astfel, studiul câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă, a debitării prin acest procedeu, prea puțin abordat până în prezent, a oferit posibilitatea realizării de cercetări teoretice și aplicative deosebite. Prin intermediul lor s-a urmărit atât confirmarea unor ipoteze tehnologice și fenomenologice emise anterior, cât și elucidarea unor aspecte care să furnizeze noi informații privind condițiile de prelucrare și rezultatele acestora, precum și deschiderea unor noi direcții de cercetare.

Rezultatele studiului, constituind contribuții personale ale autorului, pot fi sintetizate în următoarele precizări:

1. Prezentarea, într-o formă sintetică originală, a stadiului actual în cercetarea principalelor aspecte ale procesului de prelucrare prin eroziune complexă, fiind abordate fenomenele fundamentale ale prelucrării, precum și utilajele necesare.
2. Analiza caracteristicilor tehnologice, a parametrilor de stare și a factorilor de influență din punct de vedere sistemic, prin prisma cerințelor, a performanțelor și a restricțiilor impuse sistemului. În același timp s-au definit aceste noțiuni, precizându-se relațiile de interdependență dintre ele.
3. Elaborarea conceptului de sistem termodinamic la prelucrarea prin eroziune. Aceasta presupune delimitarea sistemului termodinamic general (STG) aferent ansamblului tehnologic, constituit din sistemul termodinamic primar (STP) și sistemul termodinamic secundar (STS). Din sistemul termodinamic primar s-au delimitat subsistemele corespunzătoare obiectului de prelucrat, obiectului de transfer și mediului de lucru, pentru a permite studiul schimbului de căldură în fiecare etapă și localizare a procesului.
4. Formularea principiului prelucrării prin eroziune complexă în contextul schimburilor energetice.
5. Studiul teoretic al schimbului de căldură în sistemul termodinamic primar, cu urmărirea bilanțului termoenergetic și evidențierea tuturor formelor de transfer termic, atât în interiorul fiecărui subsistem cât și între acestea.

S-au determinat relațiile matematice ce definesc bilanțul termic și energetic în fiecare sistem, s-au evidențiat, schematizat, fluxurile termoenergetice și s-au estimat procentual, în reprezentări grafice, componentele de bilanț.

6. Definirea diferitelor structuri ale sistemului termodinamic primar, uzuale și potențiale, la prelucrarea prin eroziune complexă. Dintre acestea, cele mai reprezentative au fost analizate din punct de vedere al evoluției în timp a câmpului termic și, pentru fiecare structură, s-a definit forma acestuia.

7. Stabilirea sistemului de ecuații diferențiale cu derivate parțiale care, impunându-li-se condiții mixte (limită și de frontieră), permit într-o cercetare ulterioară, determinarea câmpului termic pe cale analitică.

8. Măsurarea temperaturii componentelor sistemului termodinamic primar și prelucrarea datelor experimentale, cu evidențierea, tabelară și grafică, a evoluției acesteia.

9. Formularea metodei elementului finit la determinarea câmpului termic pentru debitarea prin eroziune complexă a unui obiect de prelucrat bară cu obiect de transfer disc în mișcare de avans radial de prelucrare. Aceasta a permis modelarea, în cazul propus, a câmpului termic pentru o descărcare singulară și pentru două descărcări simultane, la diferite cote de avans.

Rezultatele obținute prin modelare au oferit posibilitatea obținerii unor concluzii importante referitoare la:

- Distribuția căldurii între componentele sistemului termodinamic primar;
- Evoluția câmpului termic în obiectul de prelucrat;
- Implicațiile numărului descărcărilor simultane la îmbunătățirea performanțelor procesului;
- Stabilirea unor premize favorabile cercetărilor ulterioare.

10. Stabilirea unor direcții de acționare în vederea optimizării parametrilor de stare și a celor de proces la prelucrarea prin eroziune complexă (figura 7.48).

Fiind prima abordare în ceea ce privește studiul câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă, prin direcțiile de cercetare stabilite, lucrarea și-a propus să fundamenteze noțiunile referitoare la transferul de căldură și la câmpul termic rezultat în timpul procesului eroziv, la bilanțul termoenergetic în timpul prelucrării.

Rezultatele obținute ca urmare a studiului teoretic, a cercetărilor experimentale și a modelării numerice, pe lângă informațiile directe oferite, realizează o bază solidă pentru cercetări ulterioare. Acestea vor putea fi canalizate atât pentru studiul termoenergetic de detaliu, în anumite

segmente ale sistemului termodinamic primar, cât și pentru reluarea unor cercetări anterioare în care să fie coroborate aspectele tehnologice cu cele termoenergetice.

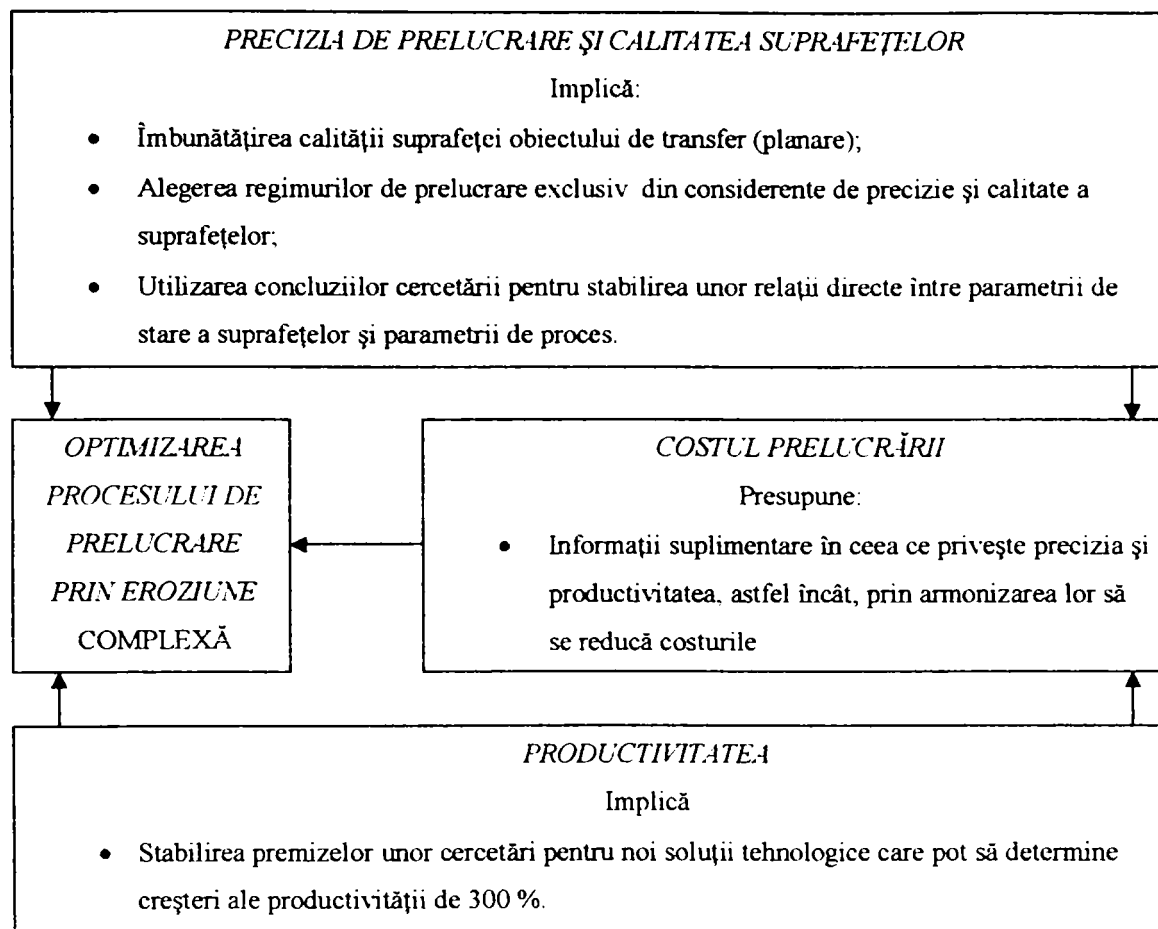


Fig. 7.48. Direcții de optimizare a procesului de prelucrare prin eroziune complexă, ca urmare a studiului câmpului termic

Prin urmare, studiul câmpului termic la prelucrarea prin eroziune complexă realizat în această etapă, reprezintă pentru cercetarea de ansamblu a fenomenului un mic segment care contribuie la întreg așa cum fiecare picătură din apa oceanului contribuie la imensitatea sa.

**BIBLIOGRAFIE**

1. Alexandru, I., ș.a., *Alegerea și utilizarea materialelor metalice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1997
2. Amza, Gh., ș.a., *Tratat de tehnologia materialelor*, Editura Academiei Române, București, 2002
3. Apostolescu, N., Taraza, D., *Bazele cercetării experimentale a mașinilor termice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979
4. Babescu, G., Stan, I., Anghelescu, Rodica, Kovacs, A., Tudor, G., Filipescu, A., *Analiză numerică*, Editura Politehnica, Timișoara, 2000
5. Bagiu, L., *Toleranțe, statistică și metrologie în construcția de mașini*, Editura Helicon, Timișoara, 1997
6. Berinde, T., ș.a., *Întocmirea și analiza bilanșurilor energetice în industrie*, Editura Tehnică, București, 1976
7. Berinde, T., Berinde, Mariana, *Bilanșuri energetice industriale*, Editura Tehnică, București, 1985
8. Bică, M., Nagi, M., *Transfer de căldură și masă*, Editura Universitatea, Craiova, 1999
9. Brătianu, C., *Metode cu elemente finite a transferului de căldură*, Icemenerg, 1985
10. Brătianu, C., Olariu, V., *Modelarea numerică cu elemente finite*, Editura Tehnică, București, 1986
11. Buzdugan, Gh., *Rezistența materialelor*, Editura Tehnică, București, 1980
12. Carabulea, A. Carabogdan, Gh., *Modele de bilanșuri energetice reale și optime*, Editura Academiei Române, București, 1982
13. Carțiș, I.Gh., *Tratamente termice*, Editura Facla, Timișoara, 1982
14. Carțiș, I.Gh., *Tratamente termochimice*, Editura Facla, Timișoara, 1988
15. Cheșa, I., ș.a., *Alegerea și utilizarea oțelurilor*, Editura Tehnică, București, 1984
16. Ciobanu, G., Gherman, O., Salin, L., *Fizică moleculară, termodinamică și statistică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
17. Ciocârdea, C., Ungureanu, I., *Bazele cercetării experimentale în tehnologia construcțiilor de mașini*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
18. Colan, H., *Studiul metalelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
19. Dehelean, D., *Sudarea prin topire*, Editura Sudura, Timișoara, 1997
20. Domșa, Ș., Miron, Z., *Îndrumător pentru utilizarea fontelor, oțelurilor și aliajelor neferoase*, Editura Tehnică, București, 1985

21. Drăgănescu, M., *Arhitectura sistemelor tehnice*, Editura Academiei R.S.R., București, 1989
22. Drăghici, I., *Tehnica sudării prin topire a metalelor și aliajelor*, Editura Tehnică, București, 1983
23. Dreucean, A., *Mașini unelte și prelucrări prin așchiere*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968
24. Faur, N., *Elemente finite. Fundamente*, Editura Politehnica, Timișoara, 2002
25. Gavrițaș, I., Marinescu, I.N., *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1991
26. Gavrițaș, I., ș.a., *Prelucrarea prin electroeroziune și eroziune electrochimică abrazivă*, Editura Tehnică, București, 1980
27. Gavrițaș, I., *Prelucrări electrice în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1991
28. Gârbea, D., *Analiza cu elemente finite*, Editura Tehnică, București, 1990
29. Gruescu, L., *Contribuții la studiul regimului tranzitoriu din circuitul electric al cuptorului de inducție*, Teză de doctorat, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, 2001
30. Herman, Mihaela, *Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică complexă*, Referat doctorat nr.1, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, 1999
31. Herman, Mihaela, *Considerații asupra câmpului termic la debitarea prin eroziune electrică complexă*, Revista de tehnologii neconvenționale nr.1/1999, Timișoara.
32. Herman, Mihaela, *Caracteristicile tehnologice și parametrii specifici la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Tehnologii Neconvenționale aplicate, Conferință Internațională, Editura Augusta, Timișoara, 1999
33. Herman, Mihaela, *Desen geometric*, Editura Augusta, Timișoara, 2000
34. Herman, Mihaela, *Caracteristici de precizie geometrică la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Secțiunea Tehnologii în construcția de mașini, 2000
35. Herman, Mihaela, *Caracteristici de stare a suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Secțiunea Tehnologii în construcția de mașini, 2000
36. Herman, Mihaela, *Caracteristici de productivitate și uzare la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Secțiunea Tehnologii în construcția de mașini, 2000
37. Herman, Mihaela, *Strategii de cercetare și calcul al câmpului termic la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Referat doctorat nr.2, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, 2000



38. Herman, Mihaela, *Bilanțul termic la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Referat doctorat nr.3, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, 2001.
39. Herman, Mihaela, *Considerations on the energy introduced in the work space at the complex erosion processing*, A XI-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN XI, Sibiu, 2003, Revista de tehnologii neconvenționale nr.2/2003
40. Herman, Mihaela, Herman, R., *Tehnologie generală*, Editura Augusta, Timișoara, 2000
41. Herman, Mihaela, Herman, R., *Factori de influență determinați de sistemul tehnic la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, A 9-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN 2000, Brașov
42. Herman, Mihaela, Herman, R., *Factori de influență determinați de obiectul de transfer, obiectul de prelucrat și lichidul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, A 9-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN 2000, Brașov
43. Herman, Mihaela, Herman, R., *L'échange de chaleur à l'usinage par érosion électrique complexe*, A X-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN X, Timișoara, 2001, Revista de tehnologii neconvenționale nr.1/2001
44. Herman, Mihaela, Herman, R., *Le bilan thermique du microsystème objet de transfert*, A X-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN X, Timișoara, 2001, Revista de tehnologii neconvenționale nr.1/2001
45. Herman, Mihaela, Herman, R., *Considerații generale privind conceptul de sistem termodinamic la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Tehnologii moderne. Calitate. Restructurare., vol. 2, Conferința Științifică Internațională TMCR 2001, 23-25 mai, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, 2001
46. Herman, Mihaela, Herman, R., *Factori de influență la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Tehnologii moderne. Calitate. Restructurare., vol. 2, Conferința Științifică Internațională TMCR 2001, 23-25 mai, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, 2001
47. Herman, Mihaela, Herman, R., *Fundamental flows in complex electrical erosion*, A XI-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN XI, Sibiu, 2003, Revista de tehnologii neconvenționale nr.1/2003
48. Herman, Mihaela, Herman, R., Lăncrăngean, Z., *Factori de influență la prelucrarea prin eroziune electrică complexă determinați de tipul prelucrării*, Analele Universității „Aurel Vlaicu” Arad, fascicola Mecanică, Mecanisme, Organe de mașini, Tehnologii de prelucrare convenționale și neconvenționale, 2000
49. Herman, Mihaela, Herman, R., Nanu, A., *Technological and energy flows in complex electrical erosion processing*, Aniversarea a 25 de ani de existență a Facultății de inginerie de



- la Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, 2001, Technical series C. Unconventional Technologies, Vol. XLVII, Sibiu, 2002
50. Herman, R., *Contribuții la teoria prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Referat doctorat 2, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1992
51. Herman, R., *Influența principalilor parametri reglabili asupra vitezei de avans la prelucrarea prin eroziune electrică*, A 6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993
52. Herman, R., *Contribuții la optimizarea realizării fantelor prin eroziune electrică complexă*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1995
53. Herman, R., *Prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Editura Augusta, Timișoara, 1998
54. Herman, R., Fleșer, T., *Influența parametrilor de lucru asupra adâncimii stratului modificat termic la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Al VII-lea Simpozion „Tehnologii și produse noi în construcția de mașini”, Suceava, 1993
55. Herman, R., Fleșer, T., *Considerații privind unele domenii de aplicare eficientă a prelucrării prin eroziune electrică complexă*, Primul Colocviu național tehnic interdisciplinar, Brăila, 1993
56. Herman, R., Gavrilă, F., *Sistem de stropire a spațiului de lucru la prelucrări prin eroziune complexă, pentru discuri cu diametrul până la 200 mm*, Certificat de inovator nr. 758/03.12.1987
57. Herman, R., Gavrilă, F., *Sistem de stropire a spațiului de lucru la prelucrări prin eroziune complexă, pentru discuri cu diametrul mai mare de 200 mm*, Certificat de inovator nr. 759/03.12.1987
58. Herman, R., Herman, Mihaela, *Factori de influență de natură mecanică la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, A 9-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN 2000, Brașov
59. Herman, R., Herman, Mihaela, *Le bilan thermique du microsysteme objet à usiner*, A X-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN X, Timișoara, 2001, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2001
60. Herman, R., Herman, Mihaela, *Le bilan thermique du microsysteme objet à usiner*, A X-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN X, Timișoara, 2001, Revista de tehnologii neconvenționale nr. 1/2001
61. Herman, R., Herman, Mihaela, *Parametri de stare și factori de influență în calculul schimbului de căldură la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Tehnologii moderne.

- Calitate. Restructurare., vol. 2, Conferința Științifică Internațională TMCR 2001, 23-25 mai, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, 2001
62. Herman, R., Herman, Mihaela, Botiș, Mihaela, *Performances index for processing by electrical complex erosion*, A XI-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN XI, Sibiu, 2003, Revista de tehnologii neconvenționale nr.2/2003
63. Herman, R., Lăncrăngean, Z., Mărcușanu, A., *Studiu comparativ asupra debitării materialelor prin eroziune electrică complexă utilizând variantele de prelucrare cu jet sau imersie*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Secțiunea Tehnologii în construcția de mașini, 1992
64. Herman, R., Lăncrăngean, Z., Mărcușanu, A., *Stabilirea ordinii de influență a principalilor parametri reglabili asupra productivității la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Secțiunea Tehnologii în construcția de mașini, 1993
65. Herman, R., Mărcușanu, A., Lăncrăngean, Z., *Contribuții privind debitarea semifabricatelor cu diametre mai mari de 100 mm prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Secțiunea Tehnologii în construcția de mașini, 1991
66. Herman, R., Mărcușanu, A., Mălaimare, G., *Analiza principalelor influențe asupra interstițiului lateral la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Sesiunea jubiliară de comunicări tehnico-științifice, Reșița, 1993
67. Herman, R., Olariu, M., Marinceu, D., *Rezultate experimentale privind debitarea oțelurilor rapide prin eroziune electrică complexă cu imersionarea obiectului de prelucrat*, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret „Tehnic 2000”, Timișoara, 1986
68. Herman, R., Vasilescu, M., *Cercetări asupra tehnologiei și utilajului de debitat bare din oțel inoxidabil prin eroziune electrică complexă*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, 1992
69. Iacob, C., ș.a., *Matematici clasice și moderne*, Editura Tehnică, București, 1983
70. Ința, I., *Complemente de fizică*, vol. II, Editura Tehnică, București, 1985
71. Kilyeni, Ș., *Metode numerice*, vol. I, II, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1997
72. Kovacs, A., Stan, I., *Capitole de matematici speciale*, Editura Politehnică, Timișoara, 2002
73. Kuzman, R., *Tabele și diagrame termodinamice*, Editura Tehnică, București, 1978
74. Landru, L.D., Lifșiț, E.M., *Fizică statistică*, Editura Tehnică, București, 1988
75. Lăncrăngean, Z., *Contribuții la prelucrarea corpurilor de revoluție prin eroziune electrică complexă*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1986

76. Lăzărescu, I., Stețiu, C., *Toleranțe. Ajustaje. Calculul cu toleranțe. Calibre*, Editura Tehnică, București, 1984
77. Leca, A., ș.a., *Transfer de căldură și masă*, Editura Tehnică, București, 1998
78. Leonăchescu, N., *Termodinamică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
79. Marinescu, I.N., ș.a., *Tehnologii de prelucrare a sculelor din materiale dure și extradure*, Editura Tehnică, București, 1985
80. Marinescu, I.N., ș.a., *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1993
81. Marinescu, I.N., Marinescu, R.D., *Managementul tehnologiilor neconvenționale*, vol. 1, Editura Economică, București, 1995
82. Marinescu, N.I., Nanu, D., Oprean, C., *Tehnologii neconvenționale. Dicționar de cuvinte*, Colecția Modernizare, perfecționare și tehnologii avansate, INID, București, 2000
83. Muscă, I., *Elemente finite*, partea I, Universitatea „Ștefan cel mare” Suceava
84. Nagi, M., Bică, M., *Transfer de căldură în regim nestaționar*, Editura Universitaria, Craiova, 2000
85. Nanu, A., *Fundamentarea teoretică a principalelor fenomene constatate experimental la prelucrarea anodo-mecanică a metalelor*, Buletinul tehnic și științific al Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, Tom 8/9, 1961
86. Nanu, A., *Tehnologia materialelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
87. Nanu, A., *Realizări în domeniul tehnologiilor neconvenționale în România*, A 4-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983
88. Nanu, A., ș.a., *Manualul inginerului mecanic*, Editura Tehnică, București, 1972
89. Nanu, A., Herman, Mihaela, *Factori de influență de natură mecanică la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, A 9-a Conferință Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN 2000, Brașov
90. Nanu, A., Nanu, D., *Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic*, Editura Facla, Timișoara, 1981
91. Nanu, A., Nichici, Al., Popa, H., *O nouă concepție asupra noțiunii de prelucrare dimensională prin eroziune*, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1971
92. Nanu, A., Popovici, V., Popovici, I., *Posibilități de dirijare și optimizare a prelucrării prin eroziune complexă*, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1971
93. Neacșu, Eleonora, Nagi, M., *Tabele, diagrame și formule termotehnice*, Litografia Universității Politehnica, Timișoara, 1997

94. Neagu, D., *Durificarea cu fascicol de electroni*, Editura Printech, București, 2001
95. Negrea, V.D., *Bazele cercetării experimentale a mașinilor termice*, partea a II-a, Litografia Institutului Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1978
96. Nerescu, I., Radcenco, V., *Analiza exergetică a proceselor termice*, Editura Tehnică, București, 1970
97. Nichici, Al., *Aspecte energetice ale tehnologiilor de prelucrare prin eroziune*, A 4-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983
98. Nichici, Al., Popovici, V., ș.a., *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*, Editura Facla, Timișoara, 1983
99. Obaciu, Gh., *Contribuții la studiul prelucrării materialelor indigene cu impulsuri dirijate*, Teză de doctorat, I. P. Brașov, 1969
100. Obaciu, Gh., *Contribuții la studiul distribuției energiei impulsului la prelucrarea electroerozivă*, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1971
101. Obaciu, Gh., *Contribuții la studiul proiectării mașinilor de electroeroziune*, Revista Construcția de mașini, nr. 7, București, 1971
102. Obaciu, Gh., *Fenomene termoenergetice la prelevarea electroerozivă prin intermediul unui nou mecanism al eroziunii*, Revista Construcția de mașini, nr. 4-5, București, 1981
103. Olariu, M., *Stadiul actual al optimizării prelucrării prin eroziune electrică*, Referat doctorat, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1993
104. Olariu, M., Herman, R., *Influența modului de spălare a interstițiului tehnologic asupra rugozității suprafețelor obținute prin eroziune electrică complexă*, Comunicările celei de-a V-a Conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1986
105. Olariu, V., *Modelare numerică cu elemente finite*, Editura Tehnică, București, 1985
106. Petrescu, S., Petrescu, Valeria, *Principiile termodinamicii*, Editura Tehnică, București, 1983
107. Petrilă, T., Gheorghiu, C.I., *Metode cu elemente finite și aplicații*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1987
108. Picoș, C., Coman, Gh., Pruteanu, O., Badea, V., *Tehnologia construcțiilor de mașini Probleme*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1976
109. Pisarciuc, C., *Aspecte electro-termice în spațiul interelectrozi la prelucrarea materialelor pe bază de policristale de diamant*, Teză de doctorat, Universitatea „Transilvania” din Brașov, 2001
110. Popa, B., Vintilă, C., *Termodinamică și mașini termice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977

111. Popovici, V., *Contribuții la studiul fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune electrică complexă*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1970
112. Popovici, V., *Tehnologia materialelor și mașini unelte*, Lito. Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1974
113. Popovici, V., Lăncrăngean, Z., Mărcușanu, A., Marinceu, D., Herman, R., Reviczky, A., Slavici, T., *Instalație de debitat prin eroziune electrică complexă*, Cerere pentru brevet de invenție nr. 0081/1991, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara
114. Radcenco, Vs., *Termodinamică tehnică și mașini termice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1976
115. Radcenco, Vs., *Criterionii de optimizare a proceselor termice (ireversibile)*, Editura Tehnică, București, 1977
116. Rădoi, I., ș.a., *Electrochimie*, Editura Facla, Timișoara, 1974
117. Roșca, A.S., *Considerații despre formularea variațională la modelarea cu elemente finite a transferului termic*, Analele Universității din Craiova, 1997
118. Roșca, A.S., *Contribuții la studiul prin analiză numerică a câmpului termic la prelucrarea prin așchiere*, Teză de doctorat, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 1997
119. Ruf, F., *Fizică statistică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
120. Sălăgean, T., *Fenomene fizice și metalurgice la sudarea cu arcul electric a oțelurilor*, Editura Academiei R.P.R., 1963
121. Sălăgean, T., *Sudarea cu arcul electric*, Editura Facla, Timișoara, 1977
122. Sălăgean, T., *Tehnologia procedeeleor de sudare cu arc*, Editura Tehnică, București, 1985
123. Sălăgean, T., ș.a., *Optimizarea sudării cu arcul electric*, Editura tehnică, București, 1988
124. Ștefănescu, D., ș.a., *Transfer de căldură și masă*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
125. Taloi, D., *Optimizarea proceselor metalurgice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
126. Tătucu, I., *Modelarea arcului electric și a câmpului termic*, Referat nr.1 doctorat, Timișoara, 1999
127. Tătucu, I., *Contribuții la modelarea arcului electric și a câmpului termic la procedeele de sudare prin topire în medii de gaze protectoare*, Teză de doctorat, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, 2001
128. Theil, H., *Termotehnică și mașini termice, Tabele și diagrame*, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1977

129. Tiron, M., *Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare*, Editura Tehnică, București, 1977
130. Trușculescu, M., *Studiul materialelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977
131. Tudor, A., *Contactul real al suprafețelor de frecare*, Editura Academiei Române, București, 1990
132. Vangheli Andru, Dorina, *Termodinamică și fizică statistică*, Editura Mirton, Timișoara, 1997
133. Vlădea, I., *Tratat de termodinamică tehnică și transmiterea căldurii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1974
134. Voinea, R., ș.a., *Introducere în mecanica solidului cu aplicații în inginerie*, Editura Academiei, 1989
135. \* \* \* COSMOS/M 2.5, program de modelare prin metoda elementului finit
136. \* \* \* *Instalație de debitat prin eroziune electrică complexă bare din oțel inoxidabil cu  $\varnothing_{max} = 100\text{ mm}$  și  $\square_{max} = 100\text{ mm}$* , Protocol cu IEPAM Birlad, Timișoara, 1988
137. \* \* \* *Sistemul internațional de unități (SI)*, Editura Academiei, București, 1989

# ANEXA

**Fișierul de comenzi pentru cazul unei singure descărcări**

Geostar V2.50

C\* Problem : miha4 Date : 06-04-2004 Time :

C\* FILE,"C:\Program Files\DesignSTAR\Working\herman\miha1.ses",1,1,1,1

VIEW,0,0,1,0

PT,1,0,0,0

PT,2,0,.01,0

PT,3,0,.05,0

PLANE,Z,0,1

CRPCIRCLE,1,1,2,0.01,360,4

CRPCIRCLE,5,3,2,0.04,360,16

EGROUP,1,TRIANG,0,1,0,0,0,0,0

CT,1,0,2,1,3,0

CT,2,0,2,1,7,0

RG,1,1,1,0

RG,2,1,2,0

RCONST,1,1,1,2,20,0

RCONST,1,2,1,2,1,0

MPROP,1,KX,31.401,DENS,8700,C,607

MPROP,2,KX,33.727,DENS,7850,C,691

ACTSET,RC,1

ACTSET,MP,1

MA\_RG,1,1,1,3,1,0

EDEL,1,1000,1

CTDENSITY,1,2,1,0.002,0.0001,1

MA\_RG,1,1,1,3,1,0

EDEL,1,20000,1

RGDENSITY,1,2,1,0.002,0.0001,1,0,1

MA\_RG,1,1,1,3,1,0

ACTSET,MP,2

ACTSET,RC,2

MA\_RG,2,2,1,3,1,0

NMERGE,1,20000,1,0.00001,0,0,0

CECR,1,525,293,4,1,0

EDEL,1,20000,1

RGDENSITY,1,2,1,0.001,0.0001,1,0,1

ACTSET,RC,1

ACTSET,MP,1

MA\_RG,1,1,1,3,1,0

ACTSET,MP,2

ACTSET,RC,2

MA\_RG,2,2,1,3,1,0

EDEL,1,20000,1

RGDEL,2,2,1

CRUNDEL,5,29,1



CRLINE,21,20,8  
CT,2,0,0.001,5,19,21,6,5,20,0  
CT,3,0,0.001,13,21,18,17,16,15,14,13,12,11,10,9,8,7,0,1  
ACTSET,MP,2  
ACTSET,RC,2  
RG,2,1,2,0  
RG,3,1,3,0  
MA\_RG,2,3,1,3,1,0  
ACTSET,RC,1  
ACTSET,MP,1  
MA\_RG,1,1,1,3,1,0  
NMERGE,1,40000,1,0.00001,0,0,0  
CECR,1,525,293,4,1,0  
CERG,2,525,293,2,1,0  
INITIAL,TEMP,1,32,1,293  
INITIAL,TEMP,33,33,1,15293  
INITIAL,TEMP,34,5638,1,293  
TIMES,0,0.001,1E-005  
A\_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0  
HT\_OUTPUT,1,1,1  
INITIAL,TEMP,5309,5311,2,468  
INITIAL,TEMP,5360,5360,1,886.8  
C\* R\_THERMAL  
C\*  
C\* COSMOS/M Geostar V2.50  
C\* Problem : miha4 Date : 06-04-2004 Time : 15:25:46