

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA

Ing. HORIA POPA

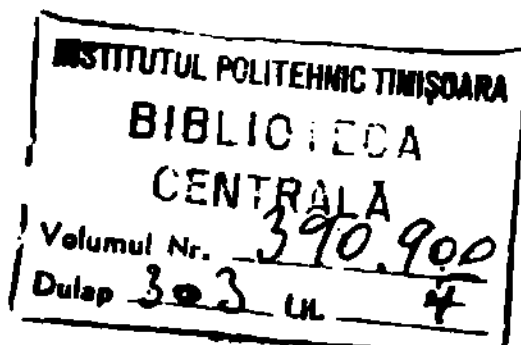
INFLUENTA METODELOR DE EXECUTIE A ELECTROZIILOR
ASUPRA CARACTERISTICILOR TEHNICO-ECONOMICE ALE
PRELUCRARIII PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU
COPIEREA FORMEI

TEZA DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific:
Prof.dr.doc.șt.ing.AUREL NANU

TIMISOARA
1980



C U P R I N S

	Pag
0. Introducere.	5
I. CERCETARI PRIVIND SISTEMELE IN TEHNOLOGIE.	9
1. Sisteme generale.	9
1.1. Concepte ale sistemelor generale.	9
1.2. Sistemele generale și tehnologia.	13
2. Sistemul de acțiune tehnologică la nivel de operație în construcția de mașini și aparate.	14
2.1. Funcție, obiectiv și variabile ale sistemului de acțiune tehnologică la nivel de operație.	14
2.2. Structura sistemului de acțiune tehnologică la nivel de operație.	17
2.2.1. Componentele sistemului.	17
2.2.2. Conexiunile sistemului.	20
2.3. Tipuri de modele pentru sistemul de acțiune tehnologică la nivel de operație.	30
3. Sisteme de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională în construcția de mașini și aparate..	32
3.1. Particularități funcționale ale sistemelor de acțiune tehnologică pentru prelucrare dimensională. ...	32
3.1.1. Funcție, obiectiv și variabile de performanță..	32
3.1.2. Complexitatea suprafeței piesei și gradul de dificultate a prelucrării dimensionale.	33
3.2. Structuri ale spațiului de lucru al sistemelor de acțiune tehnologică, la nivel de operație și metode de prelucrare dimensională fără contact.	38
3.2.1. Metode, procedee și procese tehnologice.	38
3.2.2. Funcții și structuri ale spațiului de lucru pentru operații de prelucrare dimensională cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării.	41
3.2.3. Structuri ale corpului de transfer la operații de prelucrare dimensională cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării.	44
3.2.4. Metode de prelucrare dimensională fără contact între obiectul de transfer și obiectul prelucrării.	49

3.3. Sisteme de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională prin eroziune electrică. ...	53
3.3.1. Particularități funcționale și structurale ale sistemelor de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională prin eroziune electrică.	53
3.3.2. Probleme nerezolvate ale prelucrării dimensionale prin eroziune electrică.	59
II. CERCETARI PRIVIND SISTEMUL ELECTROD DE TRANSFER PENTRU PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU COPIEREA FORMEI...	63
4. Funcția și structura electrodului de transfer pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrică.	63
4.1. Funcția electrodului de transfer.	63
4.2. Structura electrodului de transfer.	65
4.3. Calitatea electrodului de transfer.	67
5. Procese și modele ale proceselor de uzare a electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.	68
5.1. Uzură, durabilitate și coeficient de polaritate la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică. ..	68
5.2. Procese fizico-chimice la uzarea electrodului de transfer în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.	74
5.3. Procese la nivel macrogeometric în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.	76
5.3.1. Variabile geometrice și procese la nivel macroscopic.	76
5.3.2. Interdependențe între variabile la uzarea electrodului de transfer.	82
5.4. Variabile pentru caracterizarea uzării, uzurii și durabilității electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.	85
5.5. Model matematic pentru procesul de uzare a electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.	90
5.5.1. Etape în studiul proceselor la generarea suprafeței prin eroziune electrică cu copierea formei.	90

5.5.2. Utilizarea unor concepte ale termodinamicii proceselor ireversibile în teoria generală a generării suprafeței la prelucrarea dimensională....	92
5.5.3. Model matematic pentru procesul de generare a suprafeței la prelucrarea dimensională fără contact cu copierea formei.	96
5.5.4. Model matematic pentru procesul de generare a suprafeței electrodului (uzare) la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.	100
6. Cercetări experimentale privind uzarea electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.	106
6.1. Obiective și metodică a cercetărilor experimentale..	106
6.2. Mijloace, regimuri de lucru și metode utilizate la cercetarea experimentală.	108
6.3. Rezultatele cercetărilor experimentale ale procesului de uzare a electrodului de transfer.	109
6.3.1. Cercetări experimentale comparative ale uzării electrozilor plăci subțiri și electrozilor cilindrici.	109
6.3.2. Verificarea experimentală a modelului matematic pentru uzarea electrozilor plăci subțiri la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.	118
6.3.3. Concordanța dintre teorie și experiment privind mecanismul uzării electrozilor de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.	122
7. Influența uzurii electrodului de transfer asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.	123
7.1. Influența uzurii electrodului asupra caracteristicilor tehnologice ale prelucrării.	123
7.2. Influența uzurii electrodului asupra caracteristicilor economice ale prelucrării.	129
III. STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND FABRICAREA ELECTROZILOR DE TRANSFER PENTRU PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU COPIEREA FORMEI.	133
8. Studiul proced ^e lor de fabricare a electrozilor de transfer pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu	

copierea formei.	133
8.1. Domeniile aplicării optime a procedeelor de fabricare a electrozilor de transfer.	133
8.2. Posibilități de creștere a productivității prelucrării suprafeței active a electrozilor de transfer.	141
9. Cercetări privind creșterea productivității depunerii electrochimice, cu posibilități de aplicare la fabricarea electrozilor de transfer cu strat activ din cupru... ..	144
9.1. Particularități ale sistemelor de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională ... prin depunere electrochimică (galvanoplastie).	144
9.2. Stadiul actual al prelucrării prin depunere electrochimică a stratului activ al electrozilor de ... transfer.	145
9.3. Cercetări experimentale privind creșterea productivității depunerii electrochimice a cuprului, cu posibilități de aplicare la fabricația electrozilor de transfer.	147
9.3.1. Obiective și metodică a cercetărilor experimentale.	147
9.3.2. Echipamente concepute și realizate pentru cercetarea experimentală a depunerii electrochimice a cuprului.	148
9.3.3. Determinarea experimentală a frecvenței optime de activare sonică a depunerii electrochimice a cuprului.	150
9.3.4. Posibilități de aplicare a rezultatelor cercetării experimentale la fabricarea electrozilor de transfer pentru prelucrarea prin eroziune electrică.	153
10. Influența fabricării electrozilor de transfer asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.	155
10.1. Influența fabricării electrozilor asupra caracteristicilor tehnologice ale prelucrării.	155
10.2. Influența fabricării electrozilor asupra caracteristicilor economice ale prelucrării.	156
IV. CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUTIILE ORIGINALE.	162
V. LITERATURA.	168

0. INTRODUCERE

Tehnologia actuală a prelucrării dimensionale în construcția de mașini este caracterizată de extinderea continuă a domeniului de aplicare a prelucrării prin eroziune, ponderea cea mai mare, de 65...70 %, deținând-o prelucrarea prin eroziune electrică. Această pondere se datorește posibilităților tehnologice și economice ale metodei de prelucrare electroerozivă și producerii în serie a utilajelor necesare de peste 30 de ani.

Cu toate progresele realizate în producția de utilaje și în tehnologiile de prelucrare prin eroziune electrică, principalul dezavantaj al metodei îl constituie uzarea relativ ridicată a electrozilor și ponderea mare a costului acestora, de 50...60 % din costul prelucrării cu copierea formei.

În România, documentele programatice ale Partidului Comunist Român /1,2,3/ pun în fața cercetării științifice, a ingineriei tehnologice, a întreprinderilor industriale constructoare de mașini și aparate, sarcini de mare importanță pentru progresul economico-social în deceniul 1981...1990. Una din aceste sarcini o constituie perfecționarea tehnologiilor, crearea și aplicarea industrială de noi tehnologii, care să asigure sporirea mai accentuată a productivității muncii, îmbunătățirea calității producției, reducerea consumurilor specifice de materiale și energie, creșterea substanțială a eficienței economice. Legat de aceasta, în domeniul mașinilor-unelte producția va crește în cincinalul 1981...1985 de 2...2,2 ori, acordându-se prioritate și fabricației mașinilor de prelucrare electroerozivă, ceea ce va mări mult capacitățile de producție disponibile, în conformitate cu necesitățile industriei în acest domeniu.

Iată, deci, cele două motive care au determinat alegerea ca temă pentru lucrarea de față a unei probleme tehnico-economice actuale, complexe, orientată direct spre nevoile practicii industriale, cum este cercetarea influenței uzurii și fabricării electrozilor asupra caracteristicilor prelucrării prin eroziune electrică.

Așa cum se cunoaște /426, 467/, cercetarea științifică contemporană apelează tot mai mult la metoda sistemică. Aceasta nu este ecoul unei anumite mode, ci constituie un instrument științific puternic în cunoașterea și dominarea complexității. În prezent, punctul de plecare al oricărei cercetări nu mai este fenomenul

izolat, partea, elementele, ci sistemul, totalitatea, cu întreaga ei bogăție de semnificații. Din păcate, în știința tehnologiei construcției de mașini se constată însă o rămânere în urmă a abordării sistemice, ceea ce crează dificultăți în rezolvarea diverselor probleme de mare complexitate.

În aceste condiții de temă și metodă, lucrarea de doctorat a avut ca obiect rezolvarea mai multor probleme, în cadrul următoarelor direcții:

1. aprofundarea cercetării sistemice în tehnologia construcției de mașini și dezvoltarea în acest sens a bazelor sale teoretice, în mod deosebit pentru prelucrarea dimensională;

2. cercetarea teoretică și experimentală a procesului de uzare a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, respectiv a influenței uzurii asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării;

3. studii și cercetări pentru determinarea domeniilor aplicării optime a procedeelor de fabricare a electrozilor, pentru creșterea productivității și reducerea consumului specific la fabricarea electrozilor din cupru, pentru determinarea influenței fabricării electrozilor asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică.

În lucrarea de față se adoptă consecvent modul de cercetare și tratare sistemică, pornind de la totalitate spre element, de la general la particular, luând în considerare toate aspectele relevante, toate criteriile tehnice și economice importante în luarea deciziilor optime. Modelarea matematică a proceselor și dependențelor studiate, ca etapă obligatorie a cercetării sistemice, este dezvoltată întotdeauna astfel încât să satisfacă necesitățile proiectării și ale aplicării în practică a rezultatelor cercetării.

Studiul aprofundat al situației actuale pe plan mondial a constituit la fiecare problemă atacată premisa cercetării, iar verificarea experimentală directă sau indirectă a modelelor și teoriilor elaborate au încheiat direcțiile de cercetare aplicativă.

Teza de doctorat, desfășurată pe 191 pagini, cu 14 tabele, 44 figuri și 474 referințe bibliografice, este structurată pe trei părți cu 10 capitole, corespunzător obiectivului de cercetare stabilit. În partea a patra se sintetizează contribuțiile originale aduse în cadrul lucrării, iar în partea a cincea se prezintă literatura studiată sau utilizată, un număr de 23 titluri fiind lucrări publicate sau comunicate ale autorului și contracte de cercetare pentru industrie.

În partea întâia a lucrării s-au cercetat sistemele în tehnologie. După clarificarea principalelor concepte ale sistemelor generale se cercetează succesiv sistemele de acțiune tehnologică la nivel de operație, operații de prelucrare dimensională, operații de prelucrare dimensională prin eroziune electrică. Pe aceste baze teoretice, se trece în partea a doua a lucrării la cercetarea unor probleme importante nerezolvate ale sistemului electrod de transfer pentru prelucrarea prin eroziune electrică: funcții, structuri, procese și modele ale proceselor de uzare. Verificarea concordanței dintre teorie și experiment privind mecanismul deosebit de complex al uzării electrozilor este apoi continuată cu cercetarea influenței uzurii asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică - problemă esențială a proiectării procesului tehnologic. În partea treia a lucrării se studiază comparativ procedeele de fabricare a electrozilor și pe această bază se stabilesc, cu considerarea unui număr mare de criterii, domeniile optime de aplicare a lor. După cercetarea căilor de creștere a productivității la fabricarea electrozilor, concluziile teoretice generale orientează cercetarea experimentală spre activarea sonică a depunerii electrochimice a cuprului, procedeu care în varianta clasică neactivată este eficient numai la arii transversale relativ mari ale electrozilor. Rezultatele obținute justifică întrutotul aplicarea largă în practică a galvanoplastiei activate a cuprului la fabricarea de electrozi. Acest fapt este dovedit și în cadrul cercetării aprofundate a influenței fabricării electrozilor asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică.

Pornind de la cercetarea fundamental-orientată a unor probleme de mare complexitate, nerezolvate de alți cercetători, se trece la cercetarea aplicativă și la rezolvarea unor probleme practice de mare interes atât pentru proiectarea electrozilor, a procesului tehnologic de prelucrare electroerozivă cât și pentru fabricarea electrozilor, cu importante economii de materiale deficitare și de costuri. Rezultatele obținute au fost parțial aplicate sau se află în curs de aplicare în producție, la întreprinderile Electrotimiș, Electrobanat din Timișoara și la Secția de prototipuri și microproducție a Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara.

Autorul exprimă și pe această cale cele mai sincere mulțumiri conducătorului științific prof.dr.doc.șt.ing.Aurel Nanu

pentru modul competent în care l-a îndrumat la elaborarea lucrării, în formarea și specializarea sa profesională.

Autorul mulțumește de asemeni, colegilor din catedrele de Tehnologie mecanică, Material rulant și organizare, colegilor de la Secția de prototipuri și microproducție, de la întreprinderile Electrobanat și Electrotimiș, pentru ajutorul acordat pe parcursul și în finalizarea cercetărilor.

I. CERCETARI PRIVIND SISTEMELE IN TEHNOLOGIE

1. Sisteme generale.

1.1. Concepte ale sistemelor generale.

Structuralitatea este o proprietate universală a materiei. Ea exprimă capacitatea obiectelor și fenomenelor de a se organiza succesiv și nelimitat în sisteme din ce în ce mai complexe, prin relații de coordonare și subordonare.

Conceptul de sistem, corelat cu cele de structură-funcție-funcționare, oferă astăzi un fundament pentru elaborarea unei metode generale de cunoaștere și, tocmai de aceea, una din caracteristicile cunoașterii științifice contemporane constă în abordarea și interpretarea sistemică a realității, ca direcție unică a cercetării științifice, a refacerii unității științei pe un nou plan, superior /9, 76, 82, 89, 105, 134, 225, 269, 326, 344, 370, 386, 424, 426, 467/.

Noțiunea de sistem a devenit astăzi un cadru de referință obligatoriu pentru orice știință și a căpătat în ultimele decenii o utilizare din ce în ce mai largă. Această nouă orientare a științei stabilește ca punct de plecare al cunoașterii nu fenomenul izolat, elementul, ci sistemul, totalitatea, concentrându-și atenția cu precădere asupra relațiilor de simultaneitate (sincronism), corelat cu cele de succesiune (diacronism), ultimele relații fiind tipice pentru abordarea cauzală clasică.

Literatura de specialitate definește încă diferit conceptele teoriei generale a sistemelor, dar acceptă unanim ca principale următoarele noțiuni: sistem, structură, funcționare (proces), legături cu mediul (intrări, ieșiri), mediu, model, funcție, variabile, stare. Aceste noțiuni se pot defini riguros matematic /42, 52, 57, 165, 286, 415/, dar trebuie remarcat faptul că la definierea conceptelor teoriei generale a sistemelor lipsește în general analiza aspectelor substanțial - energetice - informaționale.

În cadrul limitat și pentru utilitatea lucrării de față se preferă definiții calitative ale conceptelor pentru sisteme reale /301, 467/, cu considerarea unor aspecte substanțial - energetice - informaționale.

Orice sistem este o mulțime de componente (elemente) care, în limitele anumitor condiții de spațiu și timp, interacționează între ele și funcționează, obținând un rezultat. Cu

excepția omului sau a sistemelor ce includ omul, rezultatul este inconștient și reprezintă consecința interacțiunii dialectice a sistemului cu alte sisteme.

Sistemele pot fi clasificate /301/ după proveniență în sisteme naturale (fizice; biologice) sau în sisteme create de om (abstracte; concrete). Sistemele concrete pot fi fără conștiința existenței lor (sisteme tehnice) sau cu conștiința existenței lor (sisteme de acțiune cu compunerea: om + sistem tehnic; organizații; sisteme inginerești; sisteme economice; sisteme sociale).

Un sistem concret S_C este caracterizat (fig.1.1) de o anumită structură (mod de organizare) definită de totalitatea componentelor sistemului și a conexiunilor dintre ele, respectiv de o funcționare definită ca ansamblu de procese, fiecare proces fiind o succesiune dinamică de stări în interiorul sistemului sau în trecerea de la un sistem la altul. În conformitate cu programele de funcționare corespunzătoare obiectivului (scopului) stabilit de om, procesele operează transformări asupra intrărilor în sistem, asupra sistemului însuși și realizează ieșirile din sistem. Intrările și ieșirile unui sistem concret sînt întotdeauna substanță (S), energie (E), informație (I) de diferite naturi și forme.

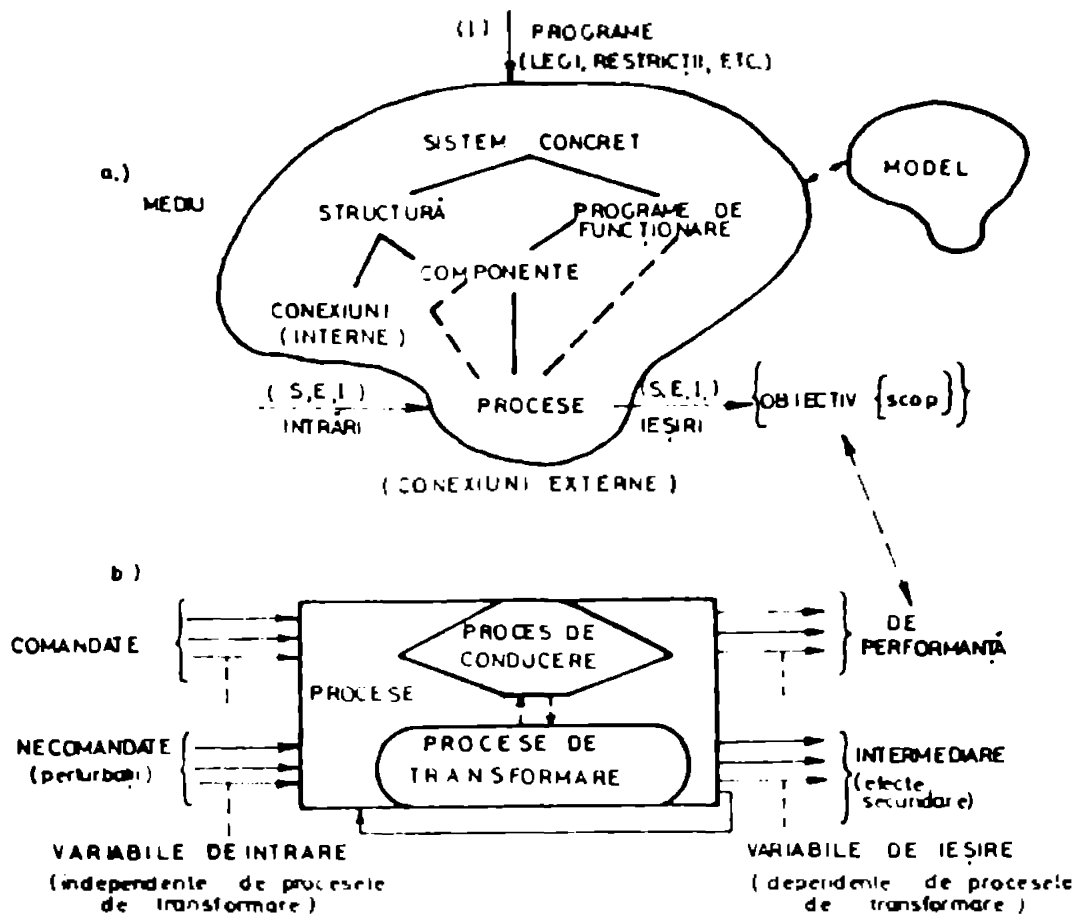


Fig.1.1. Concepte ale sistemelor concrete.
a) legături între concepte; b) procese și variabile.

Ele constituie legăturile sistemului cu mediul său exterior, fiind mult mai slabe decât legăturile (conexiunile) interne ale sistemului.

Un sistem real S_R (natural sau concret) poate fi deci definit ca o mulțime de componente C , o mulțime de relații interne R_i între componentele C , o mulțime de relații externe R_e între componentele C și mediul exterior sistemului, respectiv o mulțime de programe de funcționare P_f care determină procesele P în realizarea finalității F sau obiectivului O al sistemului :

$$S_R = \{ C, R_i, R_e, P_f, P, F \vee O \} \quad (1.1)$$

Programele de funcționare P_f sînt elemente informaționale de primă importanță în realizarea finalității, respectiv obiectivului sistemului. În sistemele reale lipsite de autoconducere (de exemplu în unele sisteme tehnice etc.) programele P_f sînt memorizate de anumite componente C și/sau rezultă ca efect al relațiilor R_i sau R_e , inclusiv al legilor naturii. În sistemele reale cu autoconducere programele P_f prezintă cea mai mare diversitate, incluzînd și ieșirile informaționale ale subsistemelor (proceselor) de conducere din interiorul sistemului S_R .

Pentru sistemele naturale finalitatea înseamnă concretizarea legilor naturii, iar pentru sistemele concrete cu conștiința existenței lor obiectivul (scopul) este elaborat conștient de către om.

Mediul unui sistem real este o mulțime de elemente (sisteme) și proprietățile lor relevante, elemente care au cel puțin o ieșire care este intrare pentru sistem sau cel puțin o intrare care este ieșire pentru sistemul real considerat. Elementele externe care afectează proprietățile irelevante ale sistemului nu fac parte din mediul său.

Modelul este un sistem teoretic (logico-matematic) sau material cu ajutorul căruia pot fi studiate indirect proprietățile și funcționarea unui alt sistem mai complex (sistemul original) cu care modelul prezintă o anumită analogie. Modelarea este un proces de cunoaștere mijlocită prin model, iar simularea este o experimentare pe model.

Funcția unui sistem este producerea unor ieșiri definite de obiectivul (scopul) sau de finalitatea sistemului, adică realizarea unei anumite submulțimi a mulțimii de legături cu mediul. Legăturile cu mediul ale unui sistem concret pot fi (fig.1.1 b)

relevante funcțional (intrări comandate și ieșiri de performanță) sau nerelevante funcțional (intrări necomandate sau perturbații și ieșiri intermediare sau efecte secundare). În cazul sistemelor concrete cu conștiința existenței lor legăturile cu mediul relevante funcțional corespund obiectivului (scopului) funcționării sistemului conștient.

De exemplu, funcția unei mașini unelte este generarea suprafeței piesei prin transformarea intrărilor relevante funcțional (obiectul prelucrării, materialul de protecție, energia primară furnizată de rețeaua electrică, informația purtată de unele componente ale spațiului de lucru, comenzile date de operator sau purtătorul de program) în ieșiri relevante funcțional (piesa și deșeurile cu anumite caracteristici). Pentru orice tip de mașină unealtă funcția derivă din obiectivul sistemului loc de muncă, definit parțial de valorile variabilelor de performanță ale procesului de generare a suprafeței (complexitatea analitică a suprafeței geometrice; dimensiunile suprafeței geometrice; precizia dimensională a suprafeței reale, referitor la dimensiuni, formă, poziție; rugozitatea suprafeței reale; precizia realizării rugozității; proprietățile fizico-chimice ale stratului de suprafață; etc.; productivitatea realizării operației; costul operației; eficiența economică a operației), respectiv de valorile impuse de programele pentru ieșiri și procese (documentația tehnică, documentația tehnologică etc.). Din mulțimea variabilelor de intrare ce caracterizează intrările în sistemul mașină unealtă, procesul de prelucrare dimensională (generare a suprafeței) transformă numai unele variabile (de exemplu, la orice prelucrare prin așchiere structura din zona interioară a obiectului prelucrării nu este transformată), iar din mulțimea variabilelor de ieșire sînt relevante funcțional numai variabilele de performanță corespunzătoare obiectivului (scopului) impus sistemului loc de muncă.

Deci, funcția unui sistem concret este proprietatea (proprietățile) utilizate ale sistemului, care transformă mulțimea mărimilor (variabilelor) de intrare relevante în mulțimea mărimilor (variabilelor) de ieșire relevante funcțional, în condiții determinate pentru variabilele nerelevante, corespunzător obiectivului (scopului) funcționării sistemului conștient considerat.

Intotdeauna funcția este determinată de mediul sistemului, din punct de vedere al mediului ea fiind o cerință funcțională. Funcția este condiționată de structură, orice sistem divizîndu-se funcțional în subsisteme specifice.

Starea unui sistem concret la un moment oarecare este mulțimea proprietăților relevante ale sistemului la momentul respectiv. Orice sistem are un număr nelimitat de proprietăți, dar numai unele sînt relevante pentru o cercetare particulară, valorile acestora constituind starea sistemului. În unele cazuri interesează pentru cercetare numai două stări posibile (pentru mașina unealtă: „funcționează” și „nu funcționează”), în altele interesează un număr mare sau nelimitat de stări posibile (pentru o mașină unealtă așchietoare: viteza de așchiere, viteza de avans, forțele de așchiere etc. cu valorile lor). Valorile mărimilor ce definesc proprietățile relevante ale sistemului se exprimă cantitativ putîndu-se măsura cu diverse unități de măsură, respectiv calitativ (pornit, oprit; închis, deschis, etc.).

În afara variabilelor independente sau dependente de procese, orice sistem este caracterizat și de valorile parametrilor, mărimi care nu prezintă nici o dependență de intrări sau de ieșiri.

1.2. Sistemele generale și tehnologia.

Așa cum s-a arătat, conceptele teoriei sistemelor s-au afirmat astăzi în cercetările multor științe. Începînd cu unele științe tehnice (automatica etc.), știința organizării și conducerii, economia, biologia, psihologia și altele, toate cultivă conceptele și metodele sistemice, elaborînd modele care, datorită izomorfismului sistemelor, au o deosebită putere de circulație /426/.

În tehnologie - înțelesă în sens restrîns ca știință a acțiunii ce studiază transformările la care este supusă substanța în procesele tehnologice de lucru și posibilitățile de aplicare eficientă a acestora în vederea obținerii de produse necesare societății, - metoda sistemică a pătruns și se aplică larg doar în cazul unor subramuri, ca de exemplu, tehnologia chimică /160, 161/. În tehnologia construcției de mașini și aparate se constată o rămînere în urmă în acest sens iar faptul, constatat și de alți autori /295/, nu poate avea decît consecințe negative pentru progresul tehnologiei, care cercetează, proiectează, realizează și exploatează sisteme tot mai complexe, vizînd optimizări tot mai avansate.

Se impune ca cercetările începute în această direcție de Kudinov /196/, Poduraev /293/, Poluianov /295/, Sakalis /377/, Nichic Alting /12/, Crișan /60/, să fie aprofundate, dezvoltînd în continuare știința tehnologiei construcției de mașini, inclusiv prin elaborarea unei teorii generale, care să pună în centrul său conceptele și metodologia oferită de teoria generală a sistemelor /41,

47, 52, 56, 91, 158, 165, 234, 286, 415, 425, 428/.

La abordarea sistemică a tehnologiei se pune în primul rând problema tipurilor de sisteme tehnologice și a ierarhiei lor.

Indiferent dacă tehnologia este înțeleasă foarte larg, ca mijloc sau capacitate de a realiza o anumită activitate /131/, sau mai restrâns, ca mijloc sau capacitate de a realiza anumite transformări ale substanței în procesele de producție /134, 257, 265, 266, 276/, sistemele elementare în tehnologie le constituie sistemele de acțiune tehnologică la nivel de operație. În afară de aceasta, în întreprinderile industriale există sisteme tehnologice formate din mai multe sisteme de acțiune tehnologică la nivel de operație. Deci, se pot delimita, cu utilitate din punct de vedere al cercetării, două clase de sisteme de acțiune tehnologică:

1. sisteme mici (sisteme de acțiune tehnologică la nivel de operație) ;
2. sisteme mari ierarhizate, formate dintr-o mulțime de sisteme mici (sisteme tehnologice la nivel de atelier; sisteme tehnologice la nivel de secție; sisteme tehnologice la nivel de întreprindere).

Toate aceste sisteme constituie respectiv subsisteme ale unor sisteme de producție ierarhizate de la simplu la complex: loc de muncă, atelier, secție, întreprindere etc. /42, 59, 161, 301/.

Deoarece lucrarea de față cercetează preponderent probleme la nivel de operații tehnologice în construcția de mașini și aparate, în continuare se aprofundează studiul sistemului de acțiune tehnologică la nivel de operație - problemă prea puțin cercetată în literatura de specialitate.

2. Sistemul de acțiune tehnologică la nivel de operație în construcția de mașini și aparate.

2.1. Funcție, obiectiv și variabile ale sistemului de acțiune tehnologică la nivel de operație.

Sistemul de acțiune tehnologică la nivel de operație (SATO) este un caz particular important al sistemului acțiunii umane - obiectul central al științei generale a acțiunii eficiente, al praxiologiei /179, 385, 386/.

Componentele SATO sînt sistemul parțial operator, care realizează cel puțin o parte a proceselor de conducere, și subsistemul utilaj, care realizează procesele de transformare și eventual o parte a proceselor de conducere din SATO.

SATO este un subsistem al sistemului loc de muncă (SLM), fiind caracterizat de un număr mai mic de componente și legături decât SLM /301/. Sistemul loc de muncă include în componența sa în plus mobilierul tehnologic, iar față de legătura (conexiunea) internă a SATO operator-utilaj, de tip preponderent informațională, prezintă în plus alte trei legături specifice, una internă referitoare la condițiile de muncă (poziție, ritm, regim de întreruperi) și două legături externe, referitoare la condițiile mediului ambiant fizico-chimice (iluminat, cromatică, zgomot, vibrații, temperatură, radiații, umiditate, circulație a aerului, compoziție a aerului etc.) respectiv la ambianța psihologică.

Mulțimea cunoscută a SATO a apărut în timp o dată cu dezvoltarea producției, a științei și tehnicii, ca o necesitate social-economică, satisfăcând o mulțime de cerințe funcționale ale mediului social-economic. Cerințele funcționale noi ale mediului impunau periodic noi performanțe, defineau noi funcții, se formulau noi obiective, se concepeau noi procese, noi utilaje tehnologice, noi SATO (fig.2.1).

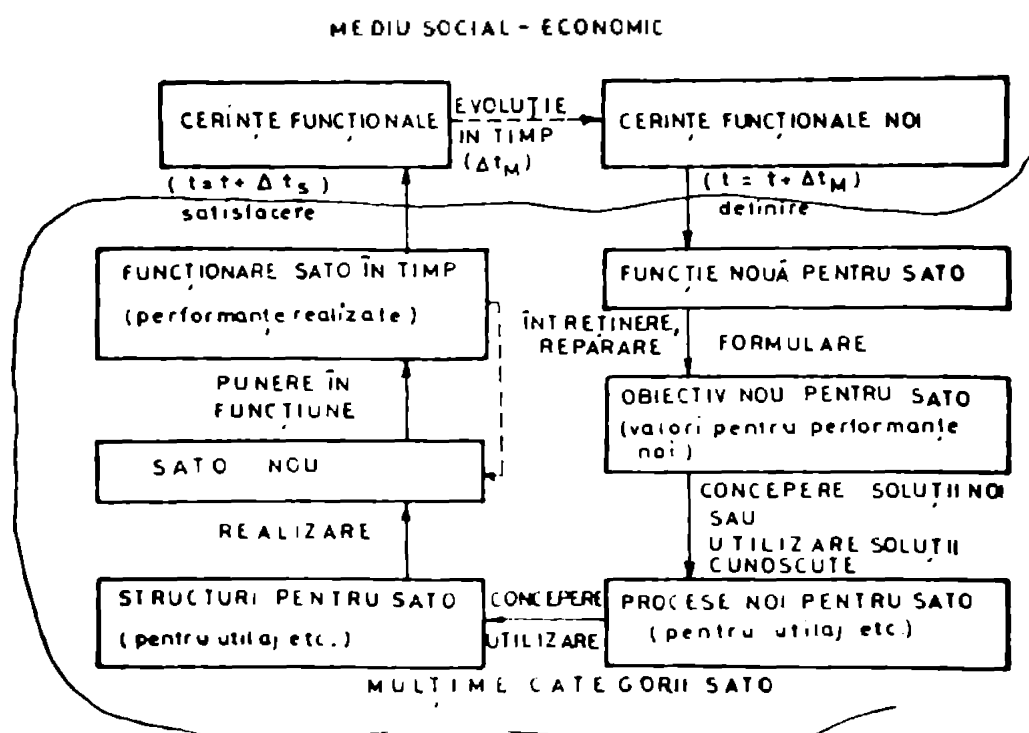


Fig.2.1. Etape în ciclul de viață al sistemelor de acțiune tehnologică la nivel de operație (SATO)

Funcția SATO este realizarea unor acțiuni (proces) fizico-chimice caracteristice operației, pentru transformarea intrărilor (corpuri supuse lucrării, material de adaos, energie primară etc.) în ieșiri (corpuri rezultat al lucrării etc.) de calitate optimă, cu înaltă productivitate și eficiență, la un cost tehnolo-

gic minim pentru tipul de producție dat /301, 302/.

Funcționarea SATO, la fel ca a oricărui sistem concret, integrează procese la toate nivelurile: informațional, energetic, substanțial. Din mulțimea nelimitată a variabilelor ce caracterizează legăturile (conexiunile) informaționale, energetice, substanțiale ale SATO cu mediul, procesele realizate de SATO transformă numai unele variabile.

Din punctul de vedere al proceselor de conducere (fig. 1.1) SATO este considerat multivariabil, în sensul că mulțimea limitată a variabilelor transformate este compusă din submulțimea variabilelor de intrare (divizată, la rândul ei, în submulțimile variabilelor comandate respectiv necomandate) și din submulțimea de ieșire (divizată la rândul ei, în submulțimile variabilelor de performanță, respectiv intermediare).

Tinând seama /301/ și de elementele procesului decizional (criterii de decizie, obiective, restricții, consecințe etc.) se pot identifica categoriile de variabile pentru operațiile tehnologice de fabricare ce pot fi realizate de mulțimea cunoscută a tipurilor de SATO (fig.2.2).

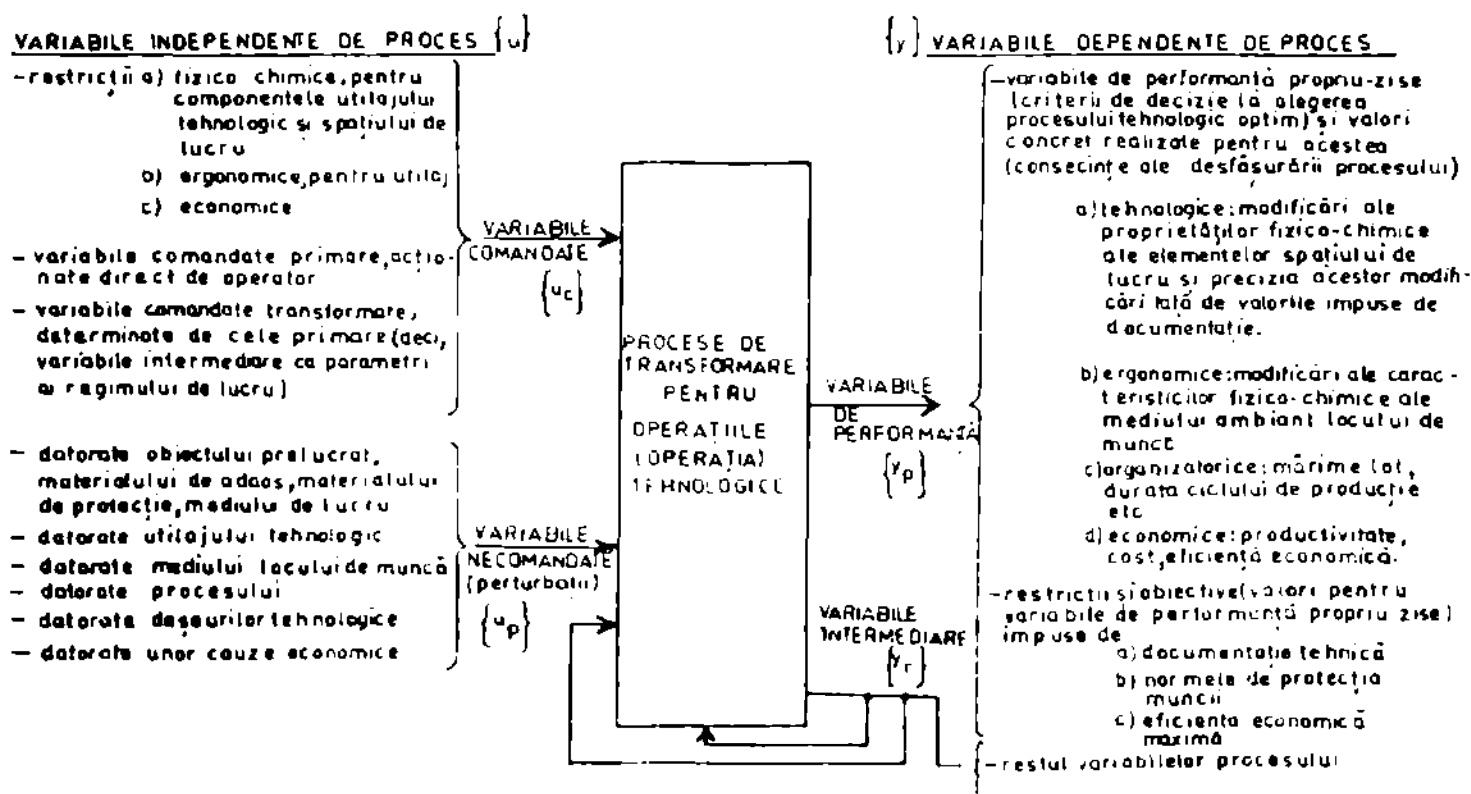


Fig.2.2. Categoriile de variabile pentru operațiile tehnologice de fabricație.

Obiectivul SATO, care în sens larg include și restricțiile impuse pentru ieșiri (limite ale valorilor admise pentru variabilele de performanță), este deci definit de valorile variabilelor de performanță $\{y_p\}$ prescrise de documentația tehnică, normele de

protecția muncii, eficiența economică maximă.

De exemplu, în cazul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului, obiectivul SATO este definit în fiecare caz concret de valorile pentru variabilele de performanță: complexitatea analitică a suprafețelor necesare de a fi prelucrate; dimensiunile acestor suprafețe geometrice; precizia dimensională impusă pentru suprafețele reale referitor la dimensiuni, formă, poziție; rugozitatea impusă suprafețelor reale; proprietățile fizico-chimice impuse stratului de suprafață a suprafețelor reale; productivitatea realizării operațiilor; costurile maxime ale realizării operațiilor etc.

2.2. Structura sistemului de acțiune tehnologică la nivel de operație.

Structura unui sistem este definită în esență de totalitatea componentelor sistemului și a legăturilor (conexiunilor) dintre ele. Identificarea structurii unui sistem poate fi considerată și ca primă etapă a modelării, care în general elaborează succesiv modele iconografice (structurale) - modele analogice (fizice) - modele logice (relații calitative între variabile) - modele matematice (relații matematice între variabile) /9, 42, 57, 160, 269, 344/.

2.2.1. Componentele sistemului.

Componentele sistemului SATO și principalele legături între ele sînt prezentate în figura 2.3, modelul structural conceput fiind valabil pentru orice metodă sau procedeu de lucru utilizat în construcția de mașini și aparate.

Pe baza analizei funcționale a metodelor și procedeelor de fabricare cunoscute /77, 80, 257, 291, 292, 315, 380, 468/ și aplicate în construcția de mașini, se definesc în continuare principalele componente ale SATO : Mașina de fabricare MF este sistemul tehnic construit în cea mai mare parte din organe solide cu mișcări relative determinate, care transformă o formă oarecare de energie primară E_{12} în energie stereomecanică E_{21} (transferată sub formă de lucru mecanic al unor corpuri rigide în mișcare), utilizată direct pentru prelucrarea, asamblarea sau dezasamblarea unor corpuri supuse lucrării CSL (fabricării sau reparării). Aparatul de fabricare AF este sistemul tehnic constituit cel puțin în parte din organe solide, imobile sau și mobile, care, excluzînd energia stereomecanică, transformă o formă de energie E_{12} în alta E_{21} , utilizată direct pentru prelucrarea, asamblarea sau dezasamblarea unor corpuri

390.900
303 F

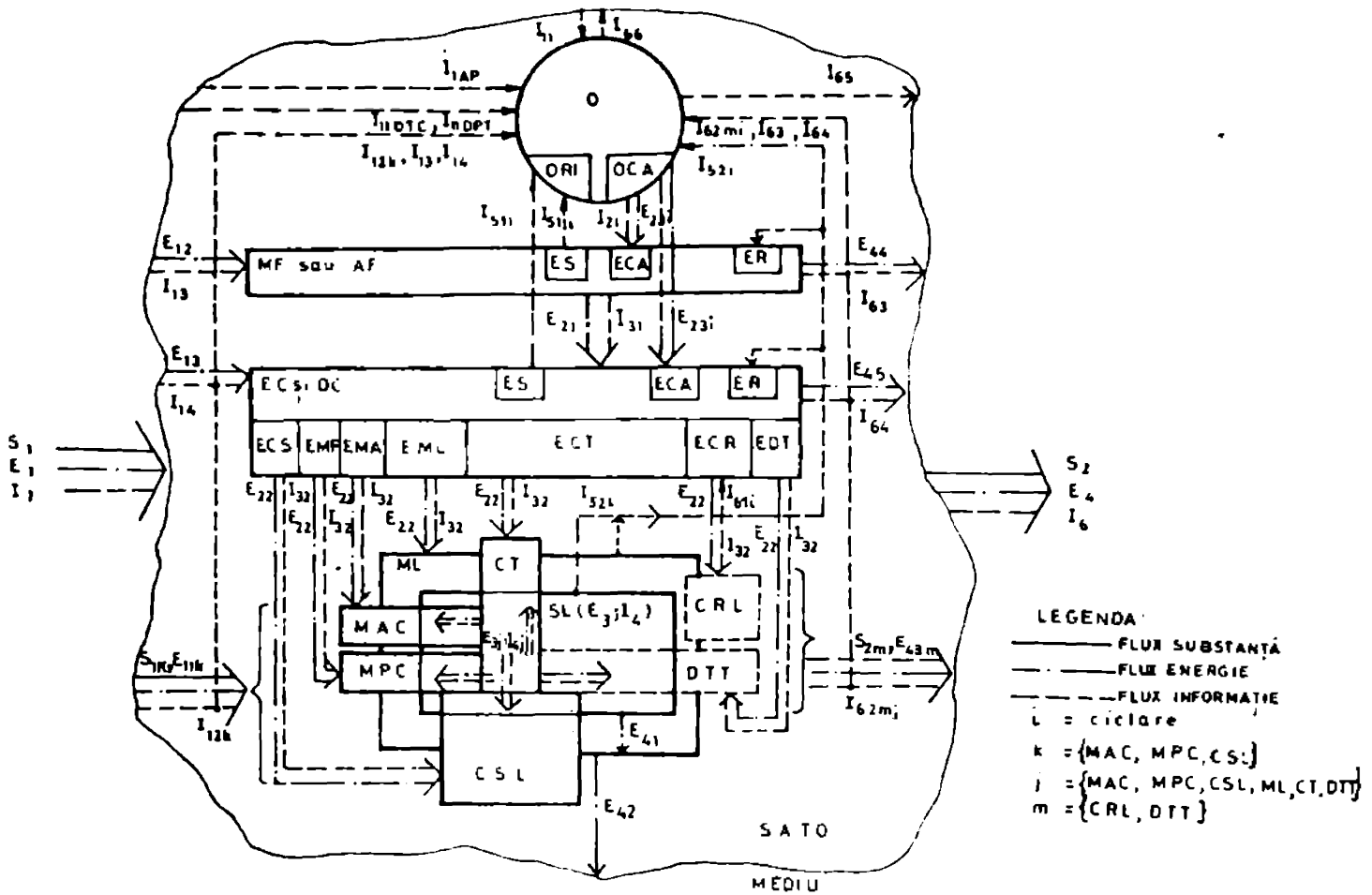


Fig.2.3. Model structural al sistemului de acțiune tehnologică la nivel de operație (SATO).

supuse lucrării. În cadrul SATO, MF sau AF sînt subsistemele tehnice principale. Un echipament de completare EC este definit ca un subsistem al SATO care completează funcțiile lipsă ale MF sau AF, transformînd în energie secundară E_{22EC} , energia primară E_{13} absorbită din mediul SATO, independent de energia E_{12} , absorbită de MF, AF. Un dispozitiv DC este definit ca EC particular, ce nu absoarbe energie primară de la mediul SATO. Un corp de transfer CT este definit ca un subsistem al SATO ce transferă în principal, la locul de desfășurare a procesului, energia secundară și informația necesară transformărilor specifice operației tehnologice respective și/sau transferă de la locul desfășurării procesului înspre mediul SATO energia necesară transformării absorbită de CSL într-o operație prealabilă (de exemplu, în cazul unor operații de prelucrare dimensională la cald, prin turnare, forjare etc., cînd CSL a fost topit respectiv încălzit în prealabil). Mediul de lucru ML este definit ca un subsistem al SATO constituit din corpul fluid care înaintea acțiunii CT este în contact cu corpul supus lucrării CSL, iar după începerea acțiunii CT este înlăturat mecanic de la suprafața CSL supusă acțiunii CT, sau este supus unor transformări fizico chimice determinate

de participarea sa la constituirea sau/și existența CT. Spațiul de lucru SL este un subsistem al SATO, definit ca volum, considerat în dinamica sa, ce cuprinde porțiunile din corpul supus lucrării CSL, corpul de transfer CT, mediul de lucru ML, materialul de adaos MAC, materialul de protecție MPC și deșeurile tehnologice DTT, în care se manifestă interacțiunile componente ale procesului ce realizează transformările (intrări-proces-ieșiri) specifice operației tehnologice respective. Echipament tehnologic ET se numește ansamblul elementelor {CT, EC, DC}, iar utilaj tehnologic UT se numește ansamblul {MF, AF, ET} la nivel de operație.

Corpurile supuse lucrării CSL sînt principalele intrări substanțiale ale SATO și împreună cu materialele de adaos MAC respectiv materialele de protecție MPC constituie intrările, transformate în cadrul SL în corpurile rezultat al lucrării CRL ca principale ieșiri substanțiale ale SATO; deșeurile tehnologice totalizate DTT sînt ieșiri substanțiale ale SATO definite ca partea transformată din elementele SL care rezultă în urma desfășurării operației tehnologice și constituie resturi ce nu mai pot fi valorificate în cadrul aceleiași operații.

Materialele de adaos MAC sînt distincte de celelalte elemente ale SL și în cadrul proceselor, împreună cu corpurile CSL (iar parțial cu CT, ML), sînt încorporate în ieșirile CRL de caracteristici impuse, în deosebi la operații de elaborare, tratament, suprafașare și sudare. Materialele de protecție MPC a corpurilor CSL sau CT realizează protecția acestora împotriva unor procese nedorite, ca de exemplu: încorporări de deșeurile DTT (la operații de elaborare, turnare, sudare etc.), formări de anumite deșeurile tehnologice (la operații de încălzire, tratament, așchiere), uzări prin frecare, eroziune etc. (la operații de deformare plastică la rece, așchiere, eroziune electrică). MPC sînt distincte de celelalte elemente ale SL numai dacă nu pot forma soluții sau suspensii în mediul de lucru ML, în materialul de adaos MAC etc.

Trebuie remarcat faptul că structura generală a spațiului de lucru SL prezentată în figura 2.3 este realizată la relativ puține operații (de exemplu, la operații de elaborare a unor materiale metalice, de sudare cu flacără). În majoritatea cazurilor SL nu cuprinde simultan toate elementele CSL, CT, ML, MAC, MPC, DTT, fie din cauza specificului operației, care nu necesită funcțional unul din elemente, fie din cauza concentrării unor elemente într-un singur corp.

În cazurile cînd în cadrul unei operații sînt necesare

succesiv mai multe tipuri de corpuri de transfer CT, SATO devine o mulțime de sisteme de acțiune tehnologică pentru o fază SATF, prin fază înțelegându-se o parte din operație ce realizează un subobiectiv tehnologic (de exemplu, prelucrarea unei singure suprafețe a CSL) cu ajutorul aceluiași CT (de exemplu, sculă) și cu același regim de lucru, adică cu aceiași parametri ai livrării energiei secundare E_{22} de către UT.

Dacă prin schimbarea corpului de transfer CT nu se modifică procedeul tehnologic, între SATO și SATF nu există decât deosebiri de extindere ale limitelor domeniului parametrilor regimurilor de lucru, SATF fiind un caz particular al SATO. În cazul modificării procedeului tehnologic, o dată cu schimbarea CT survine o înlocuire a însăși procesului, apărând un alt SL (de exemplu, la o operație de burghiere executată pe strung), caracterizat de alt tip de proces.

Modelul SATO elaborat și comentat aici are un caracter structural-funcțional general. Modelele particulare utilizate în cercetare aprofundează de fapt din cadrul modelului general o anumită parte, funcție de obiectivul cercetării. De exemplu, Kudinov /196/ dezvoltă modelul SL, pe când Simon /363/ dezvoltă modelul MF pentru operații de așchiere. Definirea elementelor din care este compus sistemul nu este constantă și se aplică numai în raport cu cercetarea unei anumite probleme.

2.2.2. Conexiunile sistemului.

Conexiunile sînt anumite relații (legături reciproce), anumite interacțiuni între obiecte și procese, ca și între proprietățile acestora.

În configurarea sistemelor se disting două tipuri (respectiv două categorii) de conexiuni sau relații /386/:

1) de subordonare, care privesc raportul dintre întreg și parte, adică dintre sistem și elementele componente (conexiuni interne), respectiv dintre sistem și suprasistem (conexiuni externe);

2) de coordonare, care privesc fie raporturile dintre elemente în cadrul sistemului (conexiuni interne, care impun o analiză structurală), fie raporturile dintre sisteme în cadrul mediului acestora, sau dintre elemente ale unor sisteme diferite (conexiuni externe care impun o analiză funcțională).

Conexiunile interne ale oricărui sistem sînt mult mai puternice decît legăturile sistemului cu mediul său exterior.

Conexiunile interne ale SATO pot fi în principal /43/:

A) de interacțiune; B) de transformare; C) de conducere.

A. Conexiunile de interacțiune reprezintă cele mai largi clase de conexiuni care, într-un fel sau altul, se manifestă în toate celelalte varietăți de conexiuni. În cadrul SATO ele necesită pentru fiecare element subsisteme specifice de interconectare (fig.2.3) care sînt: organele de recepție OR și organele de comandă-acționare OCA ale operatorului O; echipamentul de semnalizare ES, echipamentul de comandă și acționare ECA și echipamentul de recepție ER pentru cazul MF, AF și EC sau DC; echipamentele specifice ale EC și DC, necesare fiecărui element al SL (ECS, EMA, EMP, EML, ECT, ECR, EDT).

B. În cazul conexiunilor de transformare pot fi distinse fie conexiuni realizate prin intermediul unui anumit component al SATO care asigură transformare (de exemplu, transformarea energiei $E_{12} \rightarrow E_{21}$ realizată de MF sau AF), fie conexiuni realizate pe calea interacțiunii nemijlocite dintre două sau mai multe elemente ale SATO. Ultimele se desfășoară în cadrul proceselor din SL și datorită lor componentele SL, separat sau împreună, trec dintr-o stare în alta (de exemplu, interacțiunile energetice, informaționale și substanțiale între CSL, CT, ML, MAC, MPC, DTT realizate în SL, ca urmare a transferului energiei secundare E_{22} și a informației I_{32} la componentele SL). Fiecare tip de flux al transformărilor prezintă particularități distincte. Astfel :

a). Transformările informaționale prezintă particularitatea că, pe lângă fluxul determinant al informațiilor de conducere ($I_{11} \rightarrow I_{21} \rightarrow I_{31}$), fiecare component al SATO poartă structural informație proprie necesară și transferată în SL, pentru desfășurarea procesului de transformare caracteristic operației (fig.2.3). Astfel, purtători de informație geometrică pentru CRL sînt MF, AF, EC, DC, CT, CSL, iar purtători de informație pentru timpul și succesiunea evenimentelor în SL sînt MF, AF, EC, DC, SL.

b). Transformările energetice constau din punct de vedere funcțional din succesiunea: $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_3 \rightarrow E_4$, în care: E_1 este energia primară (de intrare), absorbită de la mediul SATO; E_2 este energia secundară ce poate avea orice natură fizică, fiind transferată cu caracteristicile necesare componentelor subsistemului SL {CSL, CT, ML, MAC, MPC, DTT} cît și CRL, de către componentele SATO (MF, AF sau EC); E_3 este energia terțiară (energia de efect) ce poate fi în general mecanică, termică, chimică, electrochimică, fiind energia necesară transformărilor fizico-chimice din SL, specifice

operației realizată de SATO; E_4 este ieșirea de natură energetică a SATO, atât în ce privește CRL, DTT (E_{43m}) cât și cea disipată (E_{42}). Acest flux energetic realizat de SATO este o consecință a modificării energiei totale inițiale a SATO, respectiv a subsistemului SL. În principiu, compunerea energiei totale inițiale a unui sistem fizic neizolat este dată de relația :

$$E_{tot_i} = E_{int_i} + E_{ext_i} = E_{ipi} + E_{ppi} + E_{ext_i} \quad /J/ \quad (2.1)$$

în care: E_{int_i} este energia interioară inițială, care depinde numai de mărimile de stare interne; E_{ext_i} - energia exterioară inițială, de interacțiune cu exteriorul; E_{ipi} - energia inițială de interacțiune a părților sistemului; E_{ppi} - energia proprie a părților sistemului. În timpul funcționării SATO, energia E_2 transferată la componentele SL determină creșterea energiei totale a sistemului SL, prin creșterea energiei interioare, respectiv a energiei exterioare. La atingerea unui anumit nivel energetic în spațiul de lucru se manifestă energia de efect E_3 caracteristică operației considerate, această energie determinînd de fapt transformările fizico-chimice specifice.

c). Transformările substanțiale ale intrărilor CSL, MAC, MPC, respectiv de CT în ieșiri CRL și DTT sînt de fapt o consecință a transformărilor energetico-informaționale, prezentînd simultan modificări ale proprietăților fizico-chimice de material și modificarea la CSL, CT a formei, dimensiunilor, poziției reciproce, calității suprafețelor de delimitare. Aceste modificări sînt în concordanță cu funcția SATO: realizarea anumitor caracteristici de material, respectiv generarea suprafețelor. Fluxurile de transformare în SATO se desfășoară strîns corelat, procesele informaționale și energetice fiind în general mai complexe ($I_1 \rightarrow I_3$; $E_1 \rightarrow E_4$; $S_1 \rightarrow S_2$). Procesele de transformare a substanței în conformitate cu obiectivul SATO sînt consecința transferului diferențiat al informației în SL (cu preponderență la CSL - CRL și MAC), prin intermediul transferului diferențiat al energiei (cu preponderență la CT-CSL și MAC), în condițiile realizării unui potențial generalizat P_g în spațiul de lucru SL (§.5.5.2).

C. Conexiunile de conducere sînt o varietate a conexiunilor funcționale, fiind importante generatoare de sisteme. SATO nu poate exista fără conexiunile de conducere la nivel de sistem și la nivel de subsistem O, MF, AF, EC. Modelul din figura 2.3 pune în evidență numai cele mai importante conexiuni directe și

inverse sau interne între elemente și între intrări-ieșiri. Datorită specificului proceselor din SL, în cadrul SATO studiat comenzile sînt în general discontinue, apărînd în consecință o ciclare $i = 1, 2, 3, \dots, n$ a informațiilor (fig.2.3).

Conexiunile externe ale SATO sînt bogate și variate, în cadrul categoriilor de intrări și ieșiri de substanță, energie și informație. Indiferent de gradul de automatizare a SATO, adică de ponderea participării operatorului O la funcționarea și conducerea SATO, conexiunile informaționale de subordonare I_{11} , I_{66} sînt esențiale pentru funcționarea și conducerea SATO.

În tabelul 2.1 se caracterizează în esență componentele, legăturile și categoriile de mărimi (variabile) relevante ale SATO.

Tabelul 2.1 - continuare

1	2	3	4	5	6	7	8
Legături interne	echipa- ment(e) de completare	EC	E13 → →E22&E45 I14&I1EC& &I52 → →I21&I64	a) la SATO b) completarea funcțiilor MF sau AF	-tip(procedeu tehnol. sau acțiune de servi- re) -putere maximă -rigiditate la circuit E2 -limite param.gabarit CSL,CT,MAC,CRL și protecție -limite param.regim tehnol. -disponibilitate	restric- ții	varia- bile coman- date
	dispoziti- ve) de com- pletare (ce suben- samblu dis- tinct de MF sau AF)	DC	I14&I1DC → →I22&I64 transfer E21&E13	a) la SATO b) completarea funcțiilor MF sau AF sau EC	-tip (procedeu tehnol. sau acțiune de servi- re) -rigiditate la trans- fer E2 -limite param.functi- onali -disponibilitate	restric- ții	varia- bile coman- date
	corp(uri) de transfer	CT	transfer P22CT → ICT&I32CT → →I4 I4CT →	a) la SATO b)-transfer ener- gie în SL,prepond. CSL -livrare și transfer informație în SL,prepond.CSL	-tip (procedeu tehnol.) -caracteristici de ma- terial -caracteristici de formă și dimensionale -parametri regim teh- nologic și cinematic transferat	restric- ții restric- ții variabi- le trans- formate	variabi- le co- mandate

Tabelul 2.1. - continuare

1	2	3	4	5	6	7	8
	mediu de lucru	ML	transfer E22ML I _{ML&I} 32ML → I ₄ E ₄₁ I _{4ML}	a) la SATO b) -transfer energie în SL, preponderent DTT, CSL, CT -livrare și transfer informație în SL	-caracteristici de material -parametri regim tehnologic și cinematic transferat	restricții variabile transferate	variabile comandate
Legături interne	spațiu de lucru	SL	E ₃ → E _{3j} I ₄ → I _{4j} S _{1k} → S _{2m} E _{11k} → E _{43m} I _{12k} → I _{62m} E ₄₂ →	a) la SATO b) realizarea proceselor specifice operației	-caracteristici fizico-chimice	variabile	variabile intermedie
	corp(uri) supus(e) încrării	CSL	transfer E22CS I _{CSL&I} 32CS → I ₄ S _{1CS} →	a) la mediul SATO; la SATO în decursul procesului operațional b) legătură substanțială și înformațională cu mediul SATO	-caracteristici de material -caracteristici de formă și dimensionale -parametri regim tehnologic și cinematic transferat	variabile variabile transferate	variabile necomandate variabile comandate
Întrări	materiale de adaos	MAC	transfer E22MA I _{MAC&I} 32MA → I ₄ I _{4MC} → S _{1MA} →	a) la mediul SATO; la SATO în decursul procesului operațional b) legătură substanțială și informațională cu mediul SATO	-caracteristici de material -caracteristici de formă și dimensionale -parametri regim tehnologic și cinematic transferat	variabile variabile transferate	variabile necomandate variabile comandate

Tabelul 2.1. - continuare

1	2	3	4	5	6	7	8
	material(e) de protecție a CSL, MAC, CT, CRL, UT	MPC	transfer E _{MP} I _{MPC&I32MP} → I ₄ → I _{4MP} → S _{1MP}	a) la mediul SATO; la SATO în decursul procesului operațional b) -legătură substanțială și informațională cu mediul SATO -protecție elemente SATO și realizarea performanțelor	-caracteristici de material -caracteristici de formă și dimensiunile -parametri regim transfer	variabile variabile	variabile necomandate variabile comandate
	energie primară	E ₁	I ₁ → I _{1E1} →	a) la mediul SATO b) legătură energetică și informațională cu mediul SATO	-caracteristici de tip și debitarea în timp	variabile	variabile necomandate respectiv comanda
In-	documentație tehnică pentru CRL și parțial pentru CSL, MAC	DTC	I _{11DTC} →	a) la mediul SATO; la SATO în decursul procesului operațional b) -legătură informațională cu mediul SATO -memorizare obiective pentru SATO	-caracteristici fizico-chimice ale CRL (eventual ale DTT) -caracteristici fizico-chimice (parțial) ale CSL, MAC -precizie caracteristici fizico-chimice.	restricții și obiective variabile sau restricții obiective	variabile de performanță variabile necomandate sau comanda
	documentație tehnologică pentru proces	DPT	I _{11DPT} →	a) la mediul SATO; la SATO în decursul procesului operațional b) -legătură informațională cu mediul SATO	-caracteristici UT -caracteristici CSL, MAC, MPC -nivel calificare pt. operație -parametri regim tehnologic și cinematic	restricții variabile primare	variabile comandate

Tabelul 2.1. - continuare

1	2	3	4	5	6	7	8
				-memorizare parametri optimi regim proces tehnologic	-precizie caracteristici DTC -productivitate operațiile (N_T)	obiective	variabile de performanță.
	informații pentru anticipare perturbații	IAP	$I_{LAP} \rightarrow$	a) la mediul SATO b) legături informaționale cu mediul SATO	-caracteristici prognoză perturbații	variabile	
	corp(uri) rezultat al lucrării	CRL	$I_{61i} \rightarrow$ transfer E_{2CR} , E_{43CR} , I_{62CR}	a) la mediul SATO b) legătură substanțială, energetică, informațională cu mediul SATO	-caracteristici de material -caracteristici de formă și dimensionale -precizie caracteristici CRL -productivitate operație -cost tehnologic.	variabile	variabile de performanță și intermediare
ieșiri	deșeu(ri) tehnologic(e) totalizat(e)	DTT	transfer E_{22DT} & $E_{43,S,2DT}$ $I_{32DT} \& I_{4DT} \rightarrow$ I_{62DT}	a) cu mediul SATO b) legătură substanțială, energetică, informațională cu mediul SATO	-caracteristici de material -caracteristici de formă și dimensionale -caracteristici de debitare -preț valorificare	variabile	variabile de performanță și intermediare
	informații de legătură pentru mediul SATO	I_{65}	$I_{65} \rightarrow$	a) la mediul SATO b) legătură informațională cu mediul SATO	-caracteristici fizico-chimice ieșiri	variabile	variabile intermediare

Tabelul 2.1. - continuare

1	2	3	4	5	6	7	8
Ie- șiri	informeții de rapor- tare către sistemul supraordo- nat	I ₆₆	I ₆₆ →	a) la mediul SATO b) legătură infor- mațională cu mediul SATO	-caracteristici re- alizate de SAȚO față de obiective- le I ₁₁	variabile	variabile interme- diare
	energic finală	E ₄	E ₄ →	a) la mediul SATO b) legătură energe- tică cu mediul SATO	-caracteristici de tip și debitare în timp	variabile	variabile interme- diare.

2.3. Tipuri de modele pentru sistemul de acțiune tehnologică la nivel de operație.

Modelarea, cu vastele ei aplicații în știința contemporană, nu este altceva decât o formă complexă a raționamentului prin analogie. Deși reclamă precauții, ea se dovedește deosebit de fertilă în procesul aplicării și înțelegerii unor fenomene complexe și greu accesibile cunoașterii directe.

Modelul și modelarea nu presupun abandonarea cercetării directe, experimentale a obiectului, ci, dimpotrivă, conduc la stimularea cercetării sistemului original. În cazul când originalul nu este apt, din diferite motive, pentru o cercetare experimentală, se desfășoară cercetarea experimentală pe model și apoi se transferă, cu circumspecție, unele concluzii asupra originalului. Acest "transfer" incumbă întotdeauna atât pericolul unei simplificări neadmise a originalului, cât și pericolul atribuirii către acesta a unor proprietăți care sînt specifice modelului.

De aceea, valoarea unui model într-o disciplină experimentală poate fi judecată cel puțin din două puncte de vedere:

- al capacității sale de cuprindere a faptelor experimentale stabilite și

- a valorii de adevăr a ipotezelor implicate de model.

Cînd ipotezele unui model sînt dovedite experimental ca fapte fizice, modelul în cauză devine teorie.

Formularea unei teorii, ca un concept ce se propune pentru un aspect al realității studiate, se poate denumi deci „construirea modelului”, teoria reprezentînd un model calitativ sau cantitativ (matematic) al realității.

Nu există reguli prestabilite privind construirea de modele în științe. Actul modelării presupune, totuși, trei etape generale importante :

- a) construirea modelului;
- b) acțiunea asupra modelului și studierea proprietăților sale;
- c) transferul sau extrapolarea unor concluzii de la model la original.

Dintre tipurile de modele posibile: iconografice (structurale), analogice (fizice), funcțional-procedurale (succesiunea fazelor unui proces ce trebuie executate pentru realizarea scopului), logice (relații calitative între variabile) și matematice (relații matematice între variabile), ultimele prezintă importanță deosebită și pentru sistemele de acțiune tehnologică la nivel de

operație, pentru cercetarea, proiectarea și optimizarea acestora.

Modelele matematice sînt constituite dintr-un sistem de relații matematice între variabilele sistemului (procesului) concret modelat, cu sau fără restricții. În general modelele matematice pot fi deterministe (formale), variabilele fiind legate între ele numai prin relații funcționale, sau probabiliste (stochastice), în care intervin și variabile aleatoare.

Modelele matematice pot fi /9, 86, 344, 424, 469/ ale sistemelor (modele pentru proiectare, modele pentru exploatare etc.) sau ale proceselor (modele deductive respectiv predictive; modele statice respectiv dinamice).

Un model deductiv este alcătuit dintr-o ecuație sau sistem de ecuații și eventual restricții, care permit deducerea unei variabile nemăsurate pe baza celorlalte variabile măsurate. Un model predictiv reprezintă un sistem de relații care stabilesc legătura dintre variabilele dependente și independente ale procesului, indiferent dacă sînt sau nu măsurabile, permițînd prevederea răspunsului procesului la modificarea variabilelor de intrare.

Modelul staționar descrie relații valabile în regim staționar, pe cînd modelul dinamic descrie relații valabile atît în regim staționar cît și în regim tranzitoriu.

Modelele matematice ale sistemelor de acțiune tehnologică la nivel de operație prezintă, în sens larg, aceeași diversitate de tipuri și probleme, trebuind să fie corelate cu modelul structural al SATO (fig.2.3). În formulare generală, modelul matematic al SATO se poate exprima printr-o dependență funcțională de tipul:

$$\vec{Y} = \vec{F}(\vec{U}, K) \quad (2.2)$$

în care: $\vec{F}(\vec{U}, K)$ - vector funcție de vectorul \vec{U} al variabilelor de intrare ale SATO; \vec{Y} - vectorul variabilelor de ieșire ale SATO; K - parametrii constructivi și tehnologici ai componentelor SATO.

Deci, SATO poate fi considerat un operator tehnologic ce transformă calitativ sau/și cantitativ variabilele sale de intrare în variabilele sale de ieșire, conform obiectivului impus pentru SATO.

Ca la orice sistem dinamic (cu evoluție în timp), structura internă a SATO poate fi caracterizată cu ajutorul unor mărimi interne, numite variabile de stare \vec{K} . Secționînd sistemul și atașîndu-i vectorul de stare \vec{K} , ecuația vectorială (2.2) se poate descompune în două ecuații :

$$\vec{X} = \vec{G} (\vec{U}, K) \quad (2.3)$$

$$\vec{Y} = \vec{H} (\vec{X}, \vec{U}, K) \quad (2.4)$$

Intotdeauna, ecuațiile (2.2) sau (2.3) și (2.4) se caracterizează diferit și distinct în funcție de obiectivul cercetării.

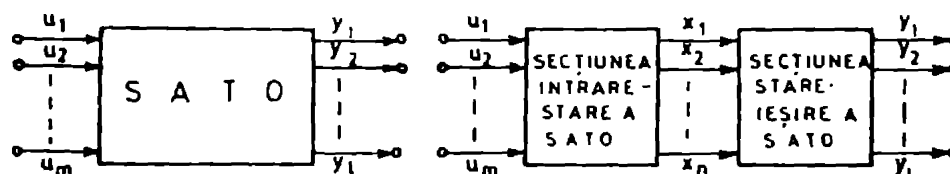


Fig.2.4. Scheme simbolice generale pentru SATO.

3. Sisteme de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională în construcția de mașini și aparate.

3.1. Particularități funcționale ale sistemelor de acțiune tehnologică pentru prelucrare dimensională.

3.1.1. Funcție, obiectiv și variabile de performanță.

Prelucrarea dimensională are cea mai mare pondere în cadrul operațiilor de fabricare desfășurate în construcția de mașini și aparate, putând fi realizată cu o mare diversitate de metode și procedee tehnologice [257].

Funcția SATO pentru prelucrarea dimensională este generarea suprafeței piesei prin transformarea intrărilor relevante funcțional (obiectul sau corpul supus prelucrării, materialul de adaos, materialul de protecție, energia primară, informația purtată de unele componente ale spațiului de lucru, comenzile date de operator sau purtătorul de program) în ieșiri relevante funcțional (piesa, deșeurile tehnologice, energia evacuată de mediu). În general, procesul de generare a suprafeței reale realizează la o piesă o anumită suprafață, cu proprietăți geometrice și fizico-mecanice determinate.

La orice tip concret de SATO pentru prelucrare dimensională funcția derivă din obiectivul sistemului loc de muncă respectiv, definit parțial de valorile variabilelor de performanță $\{y_p\}$ ale procesului de generare a suprafeței. Aceste sînt: 1.complexitatea analitică a suprafeței geometrice; 2.dimensiunile suprafeței geometrice; 3.precizia dimensională a suprafeței reale,

referitor la dimensiuni, formă, poziție; 4.rugozitatea suprafeței reale; 5.precizia de realizare a rugozității; 6.caracteristicile fizico-chimice ale materialului piesei; 7.precizia de realizare a acestor caracteristici; 8.caracteristicile fizico-chimice ale stratului de suprafață al piesei; 9.precizia de realizare a acestor caracteristici; 10.modificările caracteristicilor fizico-chimice ale mediului ambiant spațiului de lucru; 11.productivitatea operației; 12.costul operației; 13.eficiența economică a operației.

Variabila 1 definește gradul de complexitate geometrică a suprafeței piesei, iar variabilele 1...7(9) definesc gradul de dificultate a prelucrării dimensionale, ca variabile de performanță agregate ale SATO pentru prelucrare dimensională, respectiv ca proprietăți (caracteristici) ale sistemelor denumite piese.

Deși prezintă o importanță deosebită în elaborarea deciziilor optime referitoare la procese de prelucrare dimensională, definirea și cuantificarea acestor variabile agregate (care constituie implicit și criteriul de decizie) este încă nesoluționată în literatura de specialitate. În continuare se cercetează mai îndeaproape această problemă, pentru cazul general al prelucrării dimensionale.

3.1.2. Complexitatea suprafeței piesei și gradul de dificultate a prelucrării dimensionale.

Sistemele de acțiune tehnologică pentru prelucrarea dimensională au ca obiectiv realizarea unor ieșiri obiecte semifabricate sau piese cu caracteristici prescrise, prin constituirea sau modificarea formei, dimensiunilor, poziției reciproce și calității suprafețelor, pornind de la intrările corp supus prelucrării (material respectiv obiect semifabricat), material de adăos și material de protecție.

Piese și obiectele semifabricate sînt delimitate de mediul lor prin suprafețe reale, caracterizate prin număr, tip, dimensiuni, poziție relativă și calitate a suprafețelor elementare componente. O secțiune a suprafeței reale determină profilul real al acesteia. Caracteristicile suprafeței reale sînt impuse de funcția obiectului sau piesei în sistemul ce le va transforma sau încorpora și constituie mărimi de ieșire ale SATO concrete ce le-au realizat.

Indiferent de sistemele de acțiune tehnologică la nivel de operație (SATO) ce au realizat-o, suprafața reală se apropie mai mult sau mai puțin de suprafața geometrică (teoretică),

reprezentată convențional prin desen tehnic și considerată fără abateri de formă, dimensionale, de poziție și fără rugozitate.

O imagine apropiată a suprafeței (profilului) reale o constituie suprafața (profilul) efectiv, obținut prin măsurare. Gradul de apropiere a suprafeței efective de suprafața reală este direct proporțional cu precizia mijloacelor de măsurare. Abaterile de la forma geometrică și de poziție se măsoară între suprafața (profilul) efectiv și suprafața (profilul) de referință, care este o suprafață (profil) tangentă la suprafața reală în exteriorul materialului obiectului sau piesei, fiind de același tip cu suprafața geometrică respectivă /46, 84/.

Dintr-un alt punct de vedere, suprafața geometrică poate fi considerată ca urma lăsată de o linie geometrică numită generatoare, prin deplasarea ei pe o altă linie geometrică numită directoare. Generarea oricărei suprafețe geometrice necesită deci două linii geometrice de formă constantă sau variabilă în timp și deplasarea relativă a uneia dintre acestea. În general generatoarea și directoarea sînt curbe strîmbe și nu se pot exprima analitic decât în cazuri particulare /4, 46/.

Cu acest punct de vedere, generarea suprafețelor reale constă în realizarea liniilor geometrice generatoare și directoare și a mișcării lor relative de generare, prin mișcarea relativă dintre corpul supus prelucrării CSP și corpul de transfer CT respectiv materialul de adaos MAC. Mișcările de generare a suprafeței se desfășoară simultan cu procesele fizico-chimice din spațiile de lucru elementare SLE ale SATO.

Dacă CT și CSL transferă energia secundară E_{22} (vezi fig. 2.3) în general prin întregul lor volum, în spațiul de lucru SL al SATO informația I_{32} și informația stocată de CT respectiv CSL se transferă la CRL numai de către anumite părți active ale acestora, reprezentate de suprafețe, linii și puncte active reale, numite convențional elemente materiale active de transfer.

Deci, din punct de vedere macroscopic generarea suprafeței reale a piesei necesită două categorii de conexiuni între corpul supus lucrării CSL și corpul de transfer CT :

1) mișcări (acțiuni) principale, în spațiul de lucru elementar SLE al SATO, în timpul cărora se desfășoară localizat (de către elementele materiale active de transfer CT și CSL) procesele fizico-chimice caracteristice metodelor tehnologice de prelucrare dimensională (modificarea stării de agregare; deformarea plastică; ruperea în stare solidă; distrugerea locală a coeziunii după

modificarea stării de agregare sau după desfășurarea unei reacții chimice; stabilirea locală a coeziunii după modificarea stării de agregare sau după desfășurarea unei reacții chimice etc.);

2) mişcări de avans, care determină parcurgerea de către spațiul (spațiile) de lucru elementare SLE a volumului necesar din corpul supus prelucrării CSL, în scopul generării complete a suprafeței reale a piesei sau obiectului semifabricat.

În ordinea descrescătoare a cantității de informație stocată privind macrogeometria suprafeței reale prelucrate, elementele materiale active de transfer ale CT pot fi /4, 101/ :

a) suprafețe de aceeași formă sau de formă diferită de suprafața prelucrată (finală) a piesei;

b) curbe de aceeași formă sau de formă diferită de o curbă generatoare sau directoare a suprafeței prelucrate (finale) a piesei;

c) puncte, în sensul de porțiuni finite de dimensiuni foarte mici.

Deoarece informația privind macrogeometria suprafeței reale (formă, dimensiuni, poziție relativă) mai stochează și lanțurile cinematice generatoare sau auxiliare ale utilajului, respectiv portprogramele acestuia (came, șabloane, modele, benzi perforate, benzi magnetice etc.) se poate conchide că în general sursele de informație privind geometria suprafeței prelucrate sînt:

1) corpul de transfer și lanțurile cinematice auxiliare, la generarea suprafeței prin metoda copierii suprafeței active a corpului de transfer;

2) corpul de transfer, lanțurile cinematice generatoare și lanțurile cinematice auxiliare, la generarea suprafeței prin metoda rulării, urmei și tangenței;

3) corpul de transfer, lanțurile cinematice auxiliare și portprogramul, la generarea suprafeței prin metoda urmei;

4) corpul de transfer, lanțurile cinematice generatoare și auxiliare, portprogramul, la generarea suprafeței prin metoda urmei sau tangentei, cînd cel puțin una din caracteristicile suprafeței reale - formă, dimensiuni sau poziții relative - sînt date de portprogram.

Din punct de vedere matematic (analitic) suprafețele geometrice pot fi foarte diverse /4, 46, 257, 343/ :

a) analitice cu generatoare și directoare realizate de traiectorii rectilinii și circulare:

al) simple, formate dintr-o singură suprafață sau un

singur tip de suprafață și exprimate prin:

- ecuații algebrice de ordinul I (plan),
- ecuații algebrice de ordinul II, fie suprafață circulară cu generatoare dreaptă (cilindru circular, con circular, hiperboloid circular etc.), fie suprafață oarecare (sferă, tor, paraboloid, elipsoid etc.),
- ecuații algebrice de ordin superior (cvasihiperboloid etc.),
- ecuații transcendente, care conțin funcții trigonometrice sau speciale (evolventoida cercului etc.).

a2). compuse formate din mai multe suprafețe simple fie numai algebrice, fie algebrice și transcendente;

b) neanalitice cu generatoarea sau directoarea sau ambele realizate cu metode de programare (șablon, câmă, model, desen, benzi perforate și alte portprograme) și exprimate numai prin coordonate :

b1) simple, formate dintr-o singură suprafață neanalitică;

b2) compuse, formate din mai multe suprafețe simple neanalitice și analitice.

Quantificarea complexității macrogeometriei suprafeței trebuie să exprime această ierarhie și componență posibilă a suprafețelor reale.

În afara complexității geometrice (analitice) K_a a suprafeței piesei, gradul de dificultate a generării suprafeței geometrice K_g mai trebuie să ia în considerare dificultatea realizării dimensiunilor de gabarit K_d ale acesteia. În esență, aceste aspecte determină în practică soluția concretă privind metoda de generare a suprafeței și sursele de informație pentru macrogeometria piesei.

La prelucrarea prin așchiere și prin separare cu tășuri asociate, pe lângă gradul de dificultate K_g a generării suprafeței, gradul de dificultate a prelucrării dimensionale K_p , mai trebuie să ia în considerare unele caracteristici de material ale corpului supus lucrării CSL (de exemplu, rezistența de rupere la tracțiune, duritatea, plasticitatea etc.), rigiditatea CSL, rugozitatea impusă suprafeței reale, precizia dimensională impusă suprafeței reale. În esență, aceste aspecte determină în practică gradul de dificultate a realizării caracteristicilor tehnologice geometrice ale suprafeței reale, K_t .

Deoarece în cadrul lucrării de față se cercetează

probleme ale prelucrării dimensionale cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării, pentru acest caz, prin agregarea variabilelor selectate mai sus, se concep și se definesc în figura 3.1 variabilele $K_a, K_d, K_g; K_m, K_s, K_t; K_p$:

$$K_p = K_g + K_t = K_a + K_d + K_t = K_a + K_d + K_m + K_s \quad (3.1)$$

Trebuie remarcat faptul că coeficientul K_m pentru caracteristicile de material și rigiditate este definit în figura 3.1 pentru condițiile de interacțiune specifice sculelor, adică, pentru prelucrarea prin așchiere și prin separare cu tășuri asociate. Gradul de generalitate a utilizării mărimii K_p poate fi extins dacă în relația de definiție a mărimii K_m se iau în considerare și alte caracteristici de material, mai greu de cuantificat: electroconductibilitate, natură chimică etc.

Relațiile originale propuse pentru determinarea valorii K_p la prelucrarea suprafeței reale cu posibilitățile procedeeleor tehnologice actuale conduc la valorile limită din tabelul 3.1.

Tabelul 3.1

Valori limită pentru componentele gradului K_p de dificultate a prelucrării dimensionale a suprafeței reale.

Nr. crt.	Grad sau coeficient	Simbol	Valori limită
1.	coeficient de complexitate analitică a suprafeței geometrice	K_a	1,5...500
2.	coeficient de dificultate a realizării dimensiunilor de gabarit ale suprafeței.	K_d	1,0...220
3.	grad de dificultate a generării suprafeței geometrice	K_g	2,5...720
4.	coeficient pentru caracteristicile de material și rigiditate	K_m	0,5...130
5.	coeficient pentru caracteristicile tehnologice ale suprafeței reale	K_s	0,5...150
6.	grad de dificultate a realizării caracteristicilor tehnologice geometrice ale suprafeței reale	K_t	1,0...280
7.	grad de dificultate a prelucrării dimensionale a suprafeței reale	K_p	3,5...1000

Aceste valori limită au fost obținute pentru următoarele extreme: $A_{ts} = 0,00002 \text{ mm}^2$ ($\varnothing 0,005 \text{ mm}$) ... 10 m^2 ; $H_{smax} = 1...1000 \text{ mm}$; $L_{min} = 0,1 \text{ mm}$, respectiv pentru valorile extreme ale complexității formei geometrice și ale parametrilor σ_r, γ ,

HRC, R_a , T_d , T_f , T_p impuse la obiectul prelucrării și la piesă de către tehnica actuală.

Relațiile de definiție propuse au admis pentru valorile extreme o pondere de cca. 70 % a gradului de dificultate a generării suprafeței geometrice K_g . Pentru valori mici și mijlocii ale K_g (suprafețe geometrice relativ simple), ponderea K_g se reduce pînă la maxim 50...60 % din valoarea K_p .

Mărimile noi și relațiile propuse pentru determinarea gradului de dificultate a generării suprafeței geometrice K_g , respectiv a gradului de dificultate a prelucrării dimensionale a suprafeței reale K_p , prezintă generalitate și relativă simplitate. Această metodă este superioară metodicii calitativă propuse de Hoffman și Rossa /152/ sau metodelor sugerate de Mai /222/ respectiv Goranskii /124/ în ce privește caracterizarea complexității suprafeței geometrice. Față de metodele de determinare a gradului de complexitate pentru unele procedee de prelucrare prin așchiere /129, 141/ metoda elaborată este mult mai generală și ia în considerare suplimentar factori care nu pot fi ignorați în decizia privind procedeul optim de prelucrare (dimensiunile de gabarit ale suprafeței, caracteristicile de material ale obiectului prelucrat).

Componentele mărimii K_p vor fi utilizate în cadrul cercetării de față drept criterii complementare în selecția variantei optime a tehnologiei, cu care ocazie se face și o testare a sensibilității lor (cap.10).

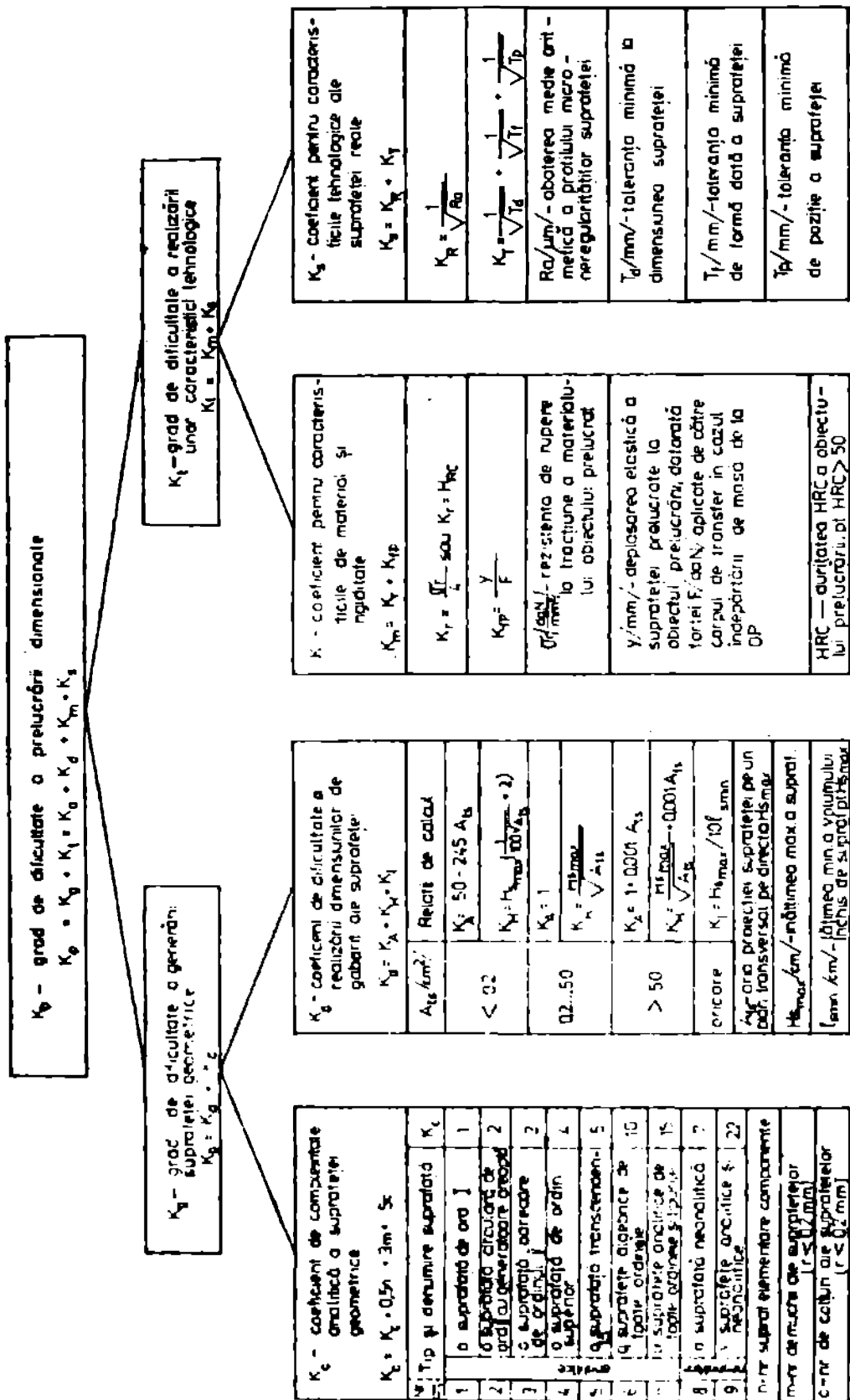
3.2. Structuri ale spațiului de lucru al sistemelor de acțiune tehnologică la nivel de operație și metode de prelucrare dimensională fără contact.

3.2.1. Metode, procedee și procese tehnologice.

Metoda tehnologică este un mod sistematic și principal de execuție a unei operații în cadrul SATO, a unei serii de operații în cadrul sistemelor de acțiune tehnologică mari ierarhizate, mod comun după un criteriu esențial (de exemplu: natura fenomenelor în spațiul de lucru, natura rezultatelor etc.) pentru mai multe clase de procedee tehnologice.

Procedeul tehnologic este determinat de mijloacele și condițiile în care se realizează o metodă tehnologică, adică diferă funcție de utilajul tehnologic, mediul de lucru etc. În cadrul fiecărei metode tehnologice se deosebesc diferite procedee tehnologice, funcție de criteriul considerat. De exemplu, în cadrul

Fig. 3.1. Componenta și relațiile de determinare a gradului de dificultate a prelucrării dimensionale



metodelor de prelucrare dimensională se disting procedee funcție de utilaj (strunjire, burghiere, frezare, rectificare etc. pentru metoda de prelucrare prin aşchiere) sau funcție de mediul de lucru (sudarea în aer, sub flux, în gaze inerte, în hidrogen, în bi-oxid de carbon etc. pentru metoda de sudare electrică prin topire).

În general metodele tehnologice de rezultat însumează diferite metode tehnologice de fenomen, cu procedee tehnologice corespunzătoare rezultatului (prelucrarea prin eroziune, sudarea, tăierea etc.).

Procesele tehnologice se realizează la nivel de loc de muncă, linie de fabricare etc., prin aplicarea diferitelor metode și procedee tehnologice, conform necesităților.

3.2.2. Funcții și structuri ale spațiului de lucru pentru operații de prelucrare dimensională cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării.

Așa cum s-a arătat (§ 2.2.1), spațiul de lucru SL este un subsistem al SATO care are funcția de a efectua direct procesele fizico-chimice ce realizează în timp transformările specifice operației respective. De exemplu, în cazul prelucrării dimensionale cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării, funcția spațiului de lucru al SATO este efectuarea directă a proceselor fizico-chimice ce determină îndepărtarea de material de la obiectul prelucrării, în conformitate cu metoda utilizată de generare a suprafeței, pentru ca în timp să se realizeze transformările specifice operației (metodei tehnologice) respective, rezultând în final suprafața reală a piesei. Astfel :

1) la metodele tehnologice de prelucrare prin separarea unor porțiuni relativ mari din obiectul prelucrării (prin rupere cu încovoiere respectiv prin străpungere, prin tăiere cu tășuri asociate) funcția spațiului de lucru este efectuarea de deformări plastice și ruperi dirijate pe anumite suprafețe ce parcurg transversal obiectul prelucrat, respectiv de îndepărtare a deșeurilor rezultat;

2) la metodele tehnologice de prelucrare prin prelevarea unor fragmente mici de la suprafața obiectului prelucrării (prin aşchiere, prin eroziune) funcția spațiului de lucru este efectuarea de deformări plastice și ruperi dirijate pe anumite suprafețe mici în stratul exterior al obiectului prelucrat (la aşchiere), respectiv efectuarea unor activări locale specifice urmate de ruperi ale legăturilor interatomice între materialul excedentar din stratul

exterior al obiectului-transformat local în deșeu- și materialul obiectului prelucrat (la prelucrarea prin eroziune).

Generarea suprafeței reale a piesei implică desfășurarea simultană și puternic corelată a unor procese de transformare a substanței, procese energetice și informaționale. Obiectivul sistemelor tehnologice de generare a suprafeței reale a piesei fiind în primul rând de natură informațională (formă, dimensiuni, poziție reciprocă și calitate a suprafeței reale a piesei), se impune și la analiza structurii spațiului de lucru ca prim punct de vedere cel informațional.

Așa cum se observă în figura 2.3, în cazul cel mai general spațiul de lucru SL al SATO se constituie în jurul interferențelor dintre corpul de transfer CT și corpul supus lucrării CSL, materialul de adaos MAC și materialul de protecție MPC.

Transmiterea informației la corpul rezultat al lucrării CRL se face în mod direct de către CT și CSL, cu participarea nesemnificativă a MAC și MPC.

În funcție de metoda de generare a suprafeței reale, spațiul de lucru al SATO (volumul SL) are o extindere diferită în raport cu suprafața piesei sau obiectului semifabricat realizat. Astfel, la generarea suprafeței reale prin copierea formei corpului de transfer CT spațiul de lucru se poate extinde în unele cazuri simultan pe întreaga suprafață a piesei (cazul prelucrării pieselor prin turnare), respectiv în cealaltă extremă, la generarea suprafeței reale prin metoda urmei, spațiul de lucru se poate extinde pe o porțiune foarte mică a suprafeței obiectului prelucrat sau piesei (cazul prelucrării pieselor prin strunjire cu cuțit neprofilat și adâncime mică de așchiere). În primul caz limită (copierea formei la turnare) corpul de transfer CT stochează practic întreaga informație despre suprafața reală a piesei, pe când celălalt caz limită (integrarea urmei punctului material de transfer la strunjire) corpul de transfer CT (vîrfurile cuțitului) stochează parțial informație despre microgeometria suprafeței reale a piesei, restul informației necesare fiind transferată de la lanțurile cinematice respectiv portprogramul strungului sau de la organele de comandă acționate de operator. Între aceste două situații limită, așa cum s-a arătat în § 3.1.2, informația despre suprafața reală a piesei este transferată cu ponderi diferite de la corpul de transfer, lanțurile cinematice, organele de comandă acționate de operator, portprogram.

Corespunzător acestor moduri de transmitere în timp a

informației la suprafața reală a piesei, spațiul de lucru poate fi imobil (cazul copierii formei la metoda de prelucrare prin turnare sau galvanoplastie) sau se poate deplasa relativ față de suprafața reală generată (celelalte cazuri și metode de generare).

Indiferent dacă spațiul de lucru se deplasează sau nu față de suprafața reală generată în timpul procesului de prelucrare (deci independent de volumul SL) se pot considera două categorii de componente (subsisteme ierarhice) ale spațiului de lucru al SATO :

a) spațiul de lucru elementar SLE, corespunzător unui element de suprafață geometrică a corpului de transfer CT (dS_{CT}), care constituie elementul macroscopic al SL, util în studiile de generare a suprafeței;

b) spațiul de lucru microscopic SLM, corespunzător unei zone mai restrânse, în care se desfășoară singular procesele fizico-chimice de bază (definitorii) ale transformării (de exemplu: deformarea plastică și fisurarea-ruperea unui element microscopic de așchie ; procese fizico-chimice care determină prelevarea de material de la o descărcare singulară prin străpungerea mediului dielectric etc.).

În desfășurarea procesului de generare a suprafeței reale, spațiul de lucru microscopic SLM „parcurge” spațiul de lucru elementar SLE, iar spațiile de lucru elementare generează în paralel (ca la prelucrarea cu copierea formei prin turnare ș.a.) sau succesiv și paralel-succesiv (ca în celelalte cazuri) forma, dimensiunile, poziția reciprocă și calitatea suprafeței reale.

Ca la orice sistem, structura spațiului de lucru este determinată de funcția SL, este subordonată acesteia, realizînd-o. Din puncte de vedere al componentelor SL, apar în practică trei categorii de determinări funcționale importante :

1) tipurile de componente ale SL (CSL, CT, ML, MAC, MPC, DTT) sînt determinate pentru fiecare caz concret de funcția SL în cadrul SATO respectiv, operațiile care să utilizeze toate componentele SL fiind relativ puține (sudarea cu flacără ș.a.);

2) numărul de componente ale SL din fiecare tip este determinat de funcția SL, putînd apare o mulțime de elemente identice sau distincte la fiecare component: p CSL - p CRL și n CT respectiv q SL etc. (prelucrarea cu mai multe scule);

3) dacă SL sau una din componentele SL devine limitată funcțional, se impune o modificare, o îmbogățire a structurii lor, astfel încît să poată satisface noua cerință funcțională impusă.

În cazul prelucrării dimensionale cel mai tipic exemplu în acest sens îl constituie limitarea funcțională a corpului de transfer la metodele tehnologice clasice de generare a suprafeței. În cadrul lucrării de față interesează mai mult metodele de prelucrare cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării OP.

3.2.3. Structuri de corpuri de transfer la operații de prelucrare dimensională cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării.

Metodele clasice importante de prelucrare dimensională cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării sînt așchiera și separarea cu tășuri asociate (se pot neglija străpungerea și ruperea cu încovoiere, care au o pondere neglijabilă în practica industrială).

Limitele de aplicabilitate ale acestor metode provin /255/ din modul de transmitere a energiei de efect mecanică (E_3) la obiectul prelucrării OP (corpul supus lucrării CSL în figura 2.3), adică provin de la corpul de transfer CT.

Atît la prelucrarea prin așchiere cît și la separarea (tăierea) cu tășuri asociate, CT este de fapt scula (obiect rigid cu forme și dimensiuni predeterminate), iar energia E_3 se transmite la OP prin contact mecanic între sculă și obiectul prelucrării. În aceste cazuri, pentru ca prelucrarea să se poată desfășura trebuie îndeplinite riguros următoarele condiții:

(a) duritatea materialului sculei să fie mai mare decît duritatea materialului obiectului prelucrat;

(b) rigiditatea sculei și a obiectului prelucrării să fie adecvată forțelor mecanice importante ce apar în timpul procesului;

(c) materialul obiectului prelucrat să nu prezinte exclusiv rupere fragilă;

(d) în cazul generării suprafețelor la așchiere scula să parcurgă suprafața în general treptat, în fîșii și straturi succesive.

Aceste condiții sînt necesare pentru a se putea realiza - cu precizia cerută funcțional pieselor - ruperea legăturilor interatomice între materialul excedentar (transformat în deșeu DT) și materialul obiectului prelucrat.

Deci, la generarea suprafeței reale a pieselor cu energie de efect mecanică transferată în regim continuu, în cazul

unui obiect al prelucrării OP în stare solidă normală (la temperatură și presiune normală, fără magnetizare, fără tensiuni remanente etc.) este necesar în primul rînd /397/ ca energia specifică de suprafață a sculei E_{SSC} să fie cît mai mare în raport cu energia specifică de suprafață E_{SOP} a obiectului prelucrat OP, corespunzător condiției (a) :

$$E_{SSC} - E_{SOP} = \Delta E_S > 0 \quad (3.2)$$

În cazul cînd valori foarte mari ale E_{SOP} (valoarea E_{SSC} fiind limitată natural) determină $\Delta E_S \rightarrow 0$, sau în cazul cînd presiunea realizabilă între sculă și OP este prea mică pentru a determina ruperea legăturilor la obiectul prelucrat, condiția (b) nefiind respectată, apar următoarele direcții fenomenologice posibile pentru a înlătura limitele metodelor clasice în generarea suprafeței reale a piesei :

(1) Micșorarea valorii E_{SOP} (durității OP) pentru un nivel dat al E_{SSC} , prin activarea proceselor de prelucrare, ca primă

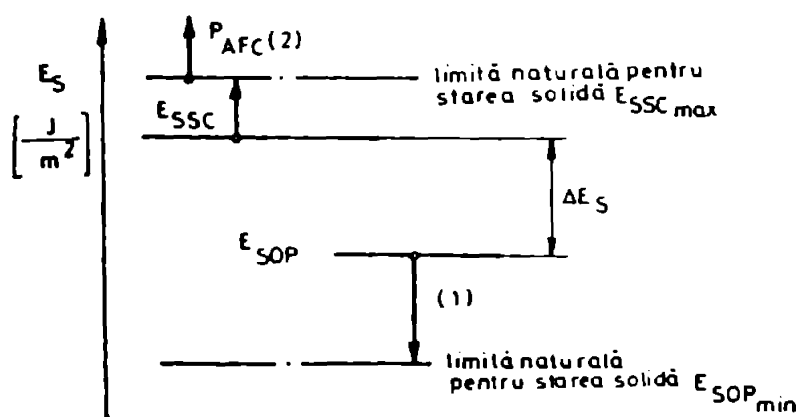


Fig.3.2. Situații ale nivelului energiei specifice de suprafață E_{SSC} a sculei și E_{SOP} a obiectului prelucrării.

direcție, concretizată în aducerea energiei interne a materialului de la suprafața OP la un nivel superior stării normale, dar sub valoarea critică de rupere a legăturilor interatomice, în contul unei energii suplimentare furnizată din exteriorul OP, eventual de un alt corp de transfer CT, potrivit necesităților. Aceasta reduce, evident, energia specifică de suprafață a

OP (fig.3.2), permițînd deplasarea unora dintre limitele tehnico-economice ale prelucrării, dar nu și eliminarea lor. Activarea presupune încălzirea, fisurarea etc. la suprafața a OP.

(2) Creșterea valorii E_{SSC} . Întrucît valoarea E_{SSC} este limitată natural (duritățile materialului sculei nu pot fi infinite de mari), rămîne ca singură soluție înlocuirea sculei, mai precis, a transducerii energiei de către corpul de transfer CT prin contact mecanic și lucru mecanic al unor corpuri rigide în mișcare (scule). Adică, este necesar să nu se utilizeze exclusiv energia

stereomecanică la ruperea legăturilor interatomice între materialul excedentar și materialul OP.

Dacă CT cu această structură (sculă) este limitat funcțional, se impune - ca în cazul oricărui sistem - o modificare, o îmbogățire a structurii lui. Deoarece limitarea funcțională provine din proprietatea de rigiditate mecanică a CT, este necesar (a doua direcție) ca corpul de transfer să transmită energia de efect la obiectul prelucrării prin intermediul unui nou component, al unui subsistem fizico-chimic, nerigid mecanic, numit agent fizico-chimic AFC. Nerigiditatea mecanică a AFC rezolvă problema (funcția) creșterii practic nelimitate a potențialului P_{AFC} (a nivelului energiei specifice, figura 3.2) la CT /397/, însă face insolubilă problema înmagazinării structurale de informație proprie, necesară pentru realizarea preciziei dimensionale a prelucrării. Din acest motiv, în structura CT trebuie să intre funcțional obligatoriu cel puțin un obiect de transfer OT rigid, cu forme și dimensiuni predeterminate, care să facă legătura energetică și informațională cu echipamentele EC și DC, cu mașina sau aparatul de fabricare MF, AF, respectiv să înmagazineze informație geometrică proprie, necesară corpului de transfer CT în cadrul procesului prelucrării dimensionale de precizie dată. În cazul când obiectul de transfer al energiei către agentul fizico-chimic nu poate stoca suficientă informație, este necesară o îmbogățire mai avansată a structurii OT, cu încă cel puțin un corp solid rigid (de exemplu, la perforarea prin explozie obiectul de transfer este compus din explozibilul care generează unda de șoc în lichid și placa de tăiere purtătoare de informație privind suprafața reală a piesei).

De fapt, principial problema se pune asemănător și la alte metode de prelucrare clasice (prin deformare plastică la rece, prin agregare de pulberi, prin depunere electrochimică etc.), putând apare în compunerea corpului de transfer obiecte de transfer și agenți fizico-chimici specifici /75, 329, 346/.

Atunci, structura corpului de transfer CT în cazul general se prezintă ca în figura 3.3.

De fapt în cazul prelucrării prin aşchiere, separare cu tăişuri asociate, prin deformare plastică sau prin agregare de pulberi, scula nu este altceva decât obiectul de transfer OT, unic component al corpului de transfer CT, când nu este necesar funcțional AFC.

Agenții fizico-chimici AFC pot fi corp lichid, corp gazos, undă de șoc în fluid, câmp și întotdeauna definesc (generează)

metode sau procedee de prelucrare dimensională distincte de cele

clasice fenomenologic /255, 293, 314, 346, 397/.

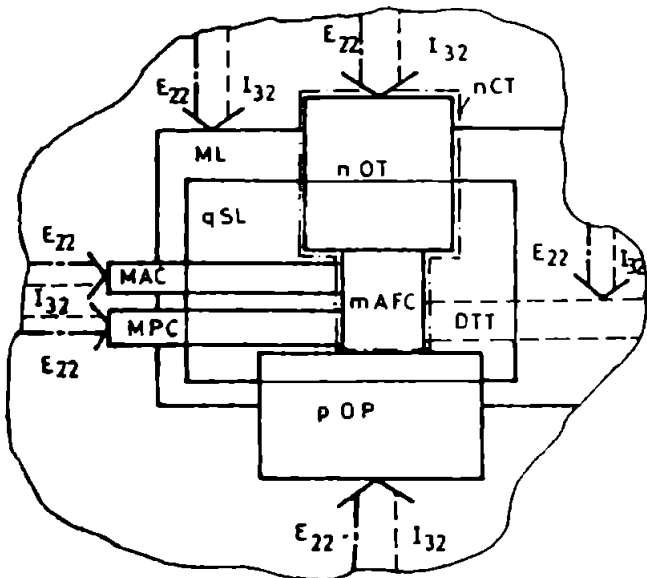


Fig.3.3. Model structural generalizat pentru spațiul de lucru SL și pentru corpul de transfer CT la prelucrarea dimensională.

Trebuie precizat faptul că și în condițiile utilizării AFC, activarea OP este funcțional necesară pentru îmbunătățirea performanțelor prelucrării dimensionale (îndeosebi productivitatea prelucrării), iar activarea generală a proceselor din spațiul de lucru se realizează pe toate căile E_{22} (vezi fig.3.3), sau chiar de către agenții fizico-chimici speciali pentru activare (AFCA).

Cele două direcții (activarea OP și generarea la CT a unor agenți fizico-chimici corespunzători), fenomenologic posibile de a înlătura limitele metodelor clasice de prelucrare dimensională cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării OP, au fost analizate pînă aici - așa cum de altfel s-a precizat - în ipoteza transferării în regim continuu a energiei $E_{22} \rightarrow E_3$ de la CT la OP (fig.2.3 și 3.3). Evident, aceasta implică caracteristici spațial-temporale corespunzătoare regimului continuu, pentru transferul energiei atît în spațiul de lucru SL, cît și în afara acestuia ($E_{41} \rightarrow E_{42} \rightarrow E_{43}$). Totodată, aceasta este cauza unor limitări ale potențialului P_{AFC} , deoarece, din motive tehnico-economice, puterea absorbită din mediul exterior SATO de către utilajul tehnologic (și corespunzător E_{12}, E_{13}) este limitată.

(3) Pentru a elimina și această limită în generarea suprafeței piesei, se poate utiliza o a treia direcție: transferarea în regim de impuls a energiei $E_{22} \rightarrow E_3$ la CT și OP și în general la SL. Aceasta permite practic realizarea oricărui nivel al potențialului P_{AFC} , iar prin modificarea caracteristicilor spațial-temporale ale transferului energiei în SL și în afara acestuia ($E_{41} \rightarrow E_{42} \rightarrow E_{43}$), permite evoluția favorabilă generală a proceselor din SL, chiar în cazul utilizării sculelor (de exemplu, la prelucrarea prin deformare plastică cu puteri și viteze mari), permite îmbunătățirea suplimentară a performanțelor tehnico-economice ale prelucrării dimensionale.

In afara acestor trei direcții de bază, mai există și altele (transferul și distribuirea spațială a energiei E_3 la OP și MAC, combinații ale direcțiilor analizate, cinematica generării suprafeței etc.) prezentate în literatură /212, 213, 293, 397/; care permit progresul metodelor și procedeele de prelucrare dimensională în construcția de mașini și aparate.

Pe aceste direcții s-au dezvoltat în ultimele patru decenii și se dezvoltă încă metodele de generare a suprafeței piesei cu prelevare de material /231, 255, 293, 314, 329, 343, 409/.

3.2.4. Metode de prelucrare dimensională fără contact între obiectul de transfer și obiectul prelucrării.

Progresul tehnico-științific și cerințele mediului social-economic au determinat în ultimele patru decenii /255, 293, 328/ o creștere deosebită a performanțelor produselor și proceselor realizate de acestea, manifestate la nivelul pieselor componente ale sistemelor tehnice prin dezvoltarea puternică a următoarelor tendințe constructive și tehnologice: 1) creșterea foarte dinamică a ponderii materialelor cu caracteristici fizico-chimice excepționale; 2) creșterea complexității formelor suprafețelor și a ponderii pieselor cu formă complexă; 3) lărgirea importantă a gamei dimensiunilor pieselor (ultraminiaturizate/gigantice); 4) creșterea ponderii pieselor cu precizie dimensională și netezime foarte ridicată a suprafeței; 5) creșterea productivității, economicității și eficienței prelucrării dimensionale.

Aceste tendințe au perspectivă de dezvoltare importantă în viitor.

În această situație, metodele clasice de prelucrare dimensională au ajuns sau tind obiectiv să ajungă în numeroase cazuri la limita de aplicabilitate tehnică sau economică, determinată de imposibilitatea de prelucrare (grad de dificultate a prelucrării dimensionale peste performanțele metodelor clasice - tendințele 1...4) respectiv de costul inacceptabil (tendința 5).

Ca răspuns la noile cerințe și tendințe, cercetarea-proiectarea și producția au creat noi metode și procedee de prelucrare dimensională, noi utilaje tehnologice.

În domeniul prelucrării dimensionale cu prelevare de material de la obiectul prelucrării, noile metode tehnologice s-au dezvoltat și se dezvoltă încă pe direcția activării proceselor îndeosebi la obiectul prelucrat, a transmiterii energiei de

efect la acestea prin diverși agenți fizico-chimici generați în structura corpului de transfer, a combinării metodelor clasice cu cele noi, a transmiterii prin impuls a energiei de efect la obiectul prelucrat.

În prezent, pe lângă metodele clasice de prelucrare dimensională, „cu contact” între obiectul de transfer și obiectul prelucrării, se aplică tot mai larg în industrie metode noi „fără contact” între obiectul de transfer și obiectul prelucrării. În cadrul acestor metode de prelucrare dimensională „fără contact” în cazul prelevării de substanță de la obiectul prelucrării se definește o nouă metodă tehnologică, de prelucrare dimensională prin eroziune /255/.

De fapt, prelucrarea dimensională prin eroziune este o metodă tehnologică de rezultat. Eroziunea obiectului prelucrat este realizată de sisteme fizico-chimice diferite de corpul solid rigid, ca îndepărtare discontinuă, cumulativă și progresivă a substanței de la suprafața obiectului OP. Prelucrarea prin eroziune se realizează industrial prin multe metode tehnologice simple sau complexe de fenomen (tabelul 3.2).

Agenții fizico-chimici din structura corpului de transfer pot fi denumiți agenți erozivi AE, energia furnizată de aceștia în spațiul de lucru, provenind fie din energia proprie în exces (la substanțe chimice active, care mai prezintă și particularitatea că pot fi stocate), fie prin transfer de la un alt sistem (la

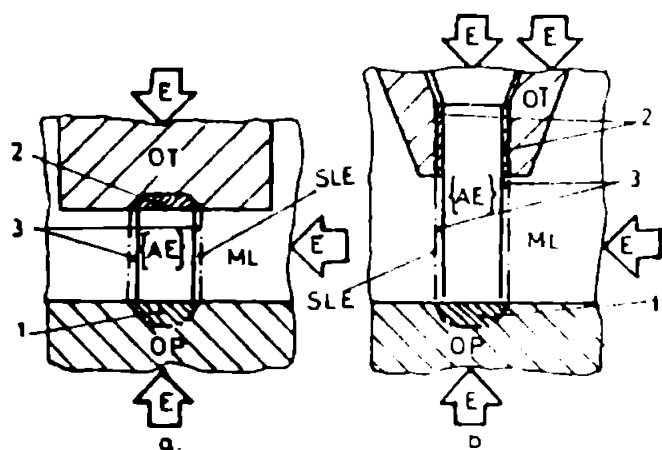


Fig. 3.4. Model structural pentru spațiul de lucru elementar SLE la prelucrare dimensională prin eroziune: a-pentru agenți erozivi AE de tip punte; b-pentru agenți erozivi AE tip jet; 1-porțiunea cu modificări ale mărimilor de stare la obiectul prelucrării OP; 2-idem la obiectul de transfer OT; 3-idem la mediul de lucru ML; E-energie furnizată de utilajul tehnologic.

jet de particule abrazive în gaz, la electrolit în câmp electric, la descărcări electrice în lichide, la radiație Laser etc.). Densitățile de putere ale agenților erozivi sînt foarte ridicate: de la 1 kW/cm^2 la agentul fizico-chimic de activare AFCA flacăra oxiscetilenică utilizată la prelucrarea prin eroziune chimică în jet de oxigen, pînă la 10^6 kW/cm^2 pentru agentul eroziv fascicul laser /200, 216, 409, 468/.

În figura 3.4 se prezintă (255/ structura spațiului de

lucru elementar la prelucrarea dimensională prin eroziune.

Tabelul 3.2.

Principalele metode de prelucrare dimensională fără contact, cu aplicabilitate tehnologică industrială frecventă.

Catego- ria me- todei	Denumirea metodei	Corp de transfer		Mediul de lucru utilizat
		Agent fizico- chimic și sculă utili- zată	Obiecte de transfer	
1	2	3	4	5
EROZIUNE S/IM	prelucrare prin e- roziune abrazivă	jet de parti- cule abrazive în gaz	duză	aer
	prelucrare prin e- roziune chimică	lichid chimic activ	mască (pt. transfer informa- ție)	aer
		jet de gaz chimic activ (oxigen)	duză	aer, apă
	prelucrare prin e- roziune electro- chimică	electrolit în câmp electric	electrod	lichid e- lectrolit
	prelucrare prin e- roziune cu plasmă	jet de plasmă	duză	aer
		arc de plasmă		
	prelucrare prin e- roziune electrică	descărcare e- lectrică în impuls	electrod	lichid di- electric
	prelucrare prin e- roziune cu fasci- cul laser	fascicul de fotoni	lentilă	aer
prelucrare prin e- roziune cu fasci- cul de electroni	fascicul de electroni	bobină	atmosferă vidată	
FORMARE S/DP	prelucrare prin de- formare electrohi- draulică	undă de șoc a descărcării electrice în impuls	electrozi și matriță (pt.trans- fer infor- mație)	lichid dielec- tric (apă)
	prelucrare prin de- formare (presare) cu explozie.	unda de șoc a exploziei	explozibil și matriță (pt.trans- fer infor- mație)	aer, apă, nisip
	prelucrare prin de- formare în câmp electromagnetic	câmp elec- tromagnetic în impuls	bobină și matriță (pt.trans- fer infor- mație)	aer

Tabelul 3.2.- continuare

1	2	3	4	5
EROZIUNE C/IM	prelucrare prin eroziune abraziv-cavitațională	suspensie abrazivă și bulă cavitațională cu câmp ultrasonic	obiect de transfer	suspensie abrazivă
	prelucrare prin contact electric	descărcare electrică și sculă electroconductoare în rotație	electrodsculă	aer, apă
	prelucrare prin eroziune electrochimică abrazivă	electrolit în câmp electric și corp abraziv	electrodsculă	lichid electro-lit
	prelucrare prin eroziune electrochimică și electrică	electrolit în câmp electric, descărcare electrică în impuls, și sculă electroconductoare în rotație sau translație alternativă	electrodsculă	lichid electro-lit

Legendă: S - metodă simplă; C - metodă combinată; IM - metodă cu îndepărtare de material de la obiectul prelucrat; DP - metodă cu deformare plastică a obiectului prelucrat.

Cu excepția lichidelor active chimice care pot fi stocate, ceilalți agenți erozivi trebuie constituiți la suprafața obiectului prelucrării de către un echipament de generare și un echipament de formare finală și poziționare aflate în componența utilajului tehnologic. Echipamentul de formare finală și poziționare constituit din unul sau mai multe corpuri solide, cu sau fără contact cu agentul eroziv AE, îndeplinește funcții legate de alimentarea cu energie a AE, poartă informație asupra formei și dimensiunilor acestuia și determină poziționarea acțiunii agentului eroziv la suprafața obiectului prelucrării.

Dintre componentele echipamentului de formare finală și poziționare, cel care transmite energie și informație finală asupra stării (inclusiv asupra formei și dimensiunilor) agentului eroziv, fiind supus în general acțiunii acestuia, este tocmai obiectul de transfer OT care împreună cu mulțimea agenților erozivi AE formează corpul de transfer CT.

În spațiul liber dintre obiectul de transfer și obiectul prelucrării, în zona în care acestea sînt cele mai apropiate una de alta pe o anumită porțiune din suprafața lor, se formează un interstițiu de grosime δ . În cazul prelucrării cu substanțe lichide active chimic $\delta = 0$.

Trebuie remarcat faptul că una din caracteristicile acțiunii de prelucrare prin eroziune, care o diferențiază net în raport cu metodele bazate pe transmiterea energiei stereomecanice, constă în capacitatea agenților erozivi ca, în limitele mărimii proprii a interstițiului δ , să realizeze procesul elementar de îndepărtare a materialului de la obiectul prelucrării OP, fără necesitatea deplasării relative a obiectului de transfer față de OP. Aceasta creează dificultăți, uneori importante, în obținerea unei precizii dimensionale ridicate a prelucrării.

În zona de interacțiune (interfața) agenți erozivi-obiect de prelucrat energia secundară transferată la aceștia în regim continuu sau regim de impuls se transformă în principal în energie de efect (mecanică, termică, chimică), care se consumă pentru separarea elementară a materialului excedentar cu constituire a deșeurilor și pentru realizarea unor modificări fizico-chimice ireversibile în porțiunile limitrofe zonei de unde a fost îndepărtat materialul excedentar.

Evacuarea de la suprafața obiectului prelucrării a deșeurilor rezultate, în afara spațiului de lucru elementar SLE respectiv în afara zonei de interacțiune posibilă între agentul eroziv și obiectul prelucrării, se realizează fie în contul energiei furnizate de agentul eroziv, fie în contul unei energii secundare suplimentare, transmisă deșeurilor prin mediul de lucru, obiectul de transfer, obiectul prelucrării, sau, mai rar, prin alt corp.

Interacțiunea agent eroziv - obiect de transfer și agent eroziv - mediul de lucru conduce în general la efecte nedorite ale prelucrării (de exemplu, eroziunea obiectului de transfer, degradarea proprietăților mediului de lucru).

Funcție de metoda de generare a suprafeței reale a piesei (vezi § 3.1.2), în afara acțiunii principale de eroziune desfășurată în spațiul de lucru elementar SLE, mai sînt necesare diverse mișcări ale SLE, atât în interstițiu (la metodele cu copiearea formei obiectului de transfer) cît și mișcări de avans realizate împreună sau cu ajutorul obiectului de transfer.

Funcțiile noi ale spațiului de lucru elementar la prelucrarea prin eroziune, datorate noii structuri a corpului de transfer, cu permis ca, o dată cu dezvoltarea SATD pentru aceste

metode de prelucrare, să se poată realiza performanțe deosebite ale prelucrării dimensionale, specifice fiecărei metode tehnologice de fenomen /314/.

Astfel se explică faptul că în prezent se manifestă tendința ca ponderea prelucrării dimensionale prin eroziune să fie de: 40...50 % la fabricarea ștanțelor, matrițelor (respectiv 60...80 % la cele cu elemente active din aliaje dure); 10...15 % la prelucrarea pieselor din aliaje de înaltă rezistență (respectiv 40...50 % la prelucrarea paletelor de turbină); 10...15 % la operații de debavurare, curățire a pieselor, turnare etc.; 7...10 % la prelucrarea pieselor din materiale mineraloceramice, feritelor, diamantelor, cuarțului, materialelor semiconductoare etc. /61, 216, 328, 390/. Se estimează că după anul 1980 ponderea prelucrării prin eroziune va atinge 10...15 % din totalul prelucrărilor dimensionale în construcția de mașini și aparate /213, 293, 328/.

3.3. Sisteme de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională prin eroziune electrică.

3.3.1. Particularități funcționale și structurale ale sistemelor de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională prin eroziune electrică.

La fiecare metodă sau procedeu tehnologic, la fiecare SATO concret, metodele structural-funcționale generale elaborate anterior (figurile 1.1; 2.2; 2.3; 3.4, tabelul 2.1), prezintă, evident, concretizări particulare.

Descoperită oarecum întâmplător /199/ în timpul cercetărilor privind procesele de eroziune electrică a contactelor electrice, prelucrarea dimensională prin eroziune electrică a răspuns încă din anii 1945...1950 la o cerință funcțională a mediului economic, de prelucrare dimensională eficientă cu îndepărtare de substanță de la obiectele din materiale electroconductoare de foarte înaltă duritate sau rezistență. În cei 35 ani de existență generațiile de SATO pentru prelucrarea electroerozivă s-au succedat dinamic (fig.2.1), în conceperea soluțiilor noi pentru procese și structuri un rol important avându-l cercetare fundamental-orientată și cercetarea aplicativă în domeniu. Se poate spune că în prezent prelucrarea prin eroziune electrică tinde să devină o metodă clasică de prelucrare dimensională, care este deja optimizată la un nivel

comparativ cu prelucrarea prin aşchiere.

SATO pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu îndepărtare de substanţă prozintă /213, 217, 293, 298, 314/ o structură incompletă a spaţiului de lucru SL, lipsind materialul de adaos MAC definit ca la § 2.2.1. Componentele SL sînt (fig .2.3 şi 3.4; tabelul 2.1) :

a) corpul supus lucrării CSL, denumit (ca la orice operaţie de prelucrare) obiectul prelucrării OP, din material electro- sau semiconductor, avînd forme şi dimensiuni predeterminate;

b) corpul de transfer CT, ca subsistem compus din obiectul de transfer OT denumit electrod de transfer ET (material electroconductor cu anumite caracteristici, avînd forme şi dimensiuni predeterminate) şi din mulţimea agenţilor erozivi AE descărcări electrice în impuls (în arc sau în scînteie), generate în timp în interstiţiul dintre OP şi ET cu echipamente specializate ale utilajului tehnologic, în urma străpungerii lichidului dielectric prezent în interstiţiul dintre OP şi ET;

c) mediul de lucru ML, denumit lichid de lucru LL, ca subsistem compus din lichidul dielectric pur (hidrocarburi, apă distilată etc.) în care pot fi dizolvate sau puse în suspensie diverse substanţe, atît cu funcţie de material de protecţie MPC (de exemplu, protecţie împotriva uzării electrodului /108/) cît şi ca deşeuri DTT (gaze, produse ale pirolizei LL, particule solide prelevate de la OP şi ET) rezultate în urma proceselor din SL.

Restul componentelor SATO (vezi fig.2.3) prezintă funcţii şi structuri adecvate metodei de generare a suprafeţei piesei P şi gradului de automatizare necesar pentru utilajul tehnologic. Cu totul specifică este funcţia generatorului de impulsuri GI /255/, care furnizează la ET şi OP energia electrică cu caracteristici necesare pentru constituirea în SL, în interstiţiul ET-OP, a agenţilor erozivi descărcările electrice.

Prelucrarea prin eroziune electrică permite realizarea tuturor metodelor cunoscute de generare a suprafeţelor (copiere, rulare, integrarea urmei, tangenţă) /88, 213, 253/. Acest fapt este singular în cadrul procedurilor de prelucrare dimensională cunoscute de tehnica actuală şi se datoreşte lipsei mişcării principale (în sensul definit la prelucrarea prin aşchiere), respectiv forţei deosebit de complexe ce o poate avea suprafaţa activă a electrodului, dimensiunile microscopice ale agentului eroziv descărcarea electrică singulară.

În cadrul metodelor de generare, copierea formei suprafe-

ței active a ET este utilizată în prezent în proporție de 80 %, prelucrându-se prin eroziune electrică suprafețele ce nu pot fi generate convenabil prin așchiere, cu valori ale coeficienților $K_c \geq 10$ și $K_a \geq 35$ (fig.3.1). Circa 15 % este ponderea generării suprafeței prin integrare dublă a urmei cu ET filiform, restul de 5 % fiind în prezent ponderea generării suprafeței prin alte metode, realizate pe mașini speciale sau specializate, respectiv mașini echipate cu capete de lucru speciale sau universale. Substanța activă a electrodului ET stochează cantități diferite de informație referitoare la suprafața piesei de prelucrat: maximă la prelucrarea cu copierea formei, minimă la prelucrarea cu electrod filiform /258/.

Cu utilajele și echipamentele de completare (capete de lucru universale) existente, se pot realiza /88, 352, 360, 403/ 100 variante de operații la prelucrarea prin eroziune electrică. La toate aceste variante se poate identifica distinct ierarhia spațiilor de lucru : pentru SATO (SL) - elementar (SLE) - microscopic (SLM), conform celor demonstrate la § 3.2.2. Spațiul de lucru microscopic SLM trebuie considerat tocmai cel corespunzător unei descărcări electrice singulare. Așa cum au demonstrat diferite cercetări /135, 213, 217, 314, 409, 423, 432/, la prelucrarea prin eroziune electrică grosimea interstițiului dintre ET și OP are valoarea $\delta = (0,005 \dots 0,5)$ mm iar diametrul minim de concentrare a fluxului de energie are valoarea 1 μ m.

O concluzie imediată a acestei ierarhii este aceea că în cercetarea sistemelor ce se pot delimita la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică trebuie considerate strict procesele și componentele sistemelor studiate și nicidecum procesele și componentele subsistemelor. De exemplu, cercetarea generării suprafeței piesei trebuie să considere componentele spațiului de lucru SL (OP, ET, AE, LL, DTT) cu proprietățile lor exprimate la nivel macroscopic, respectiv procesele integrale din interstițiul activ (în care se desfășoară mulțimea descărcărilor electrice AE) și pasiv (fără descărcări electrice). Cercetarea proceselor și componentelor la nivelul spațiului de lucru microscopic SLM (descărcare electrică singulară) nu poate aduce informații relevante pentru generarea macroscopică a suprafeței piesei. Acest adevăr a fost demonstrat și recunoscut abia în ultimii 10 ani /217/, după ce timp de 25 de ani cercetările teoretice și experimentale s-au străduit în primul rând să elucideze și să modeleze procesele complexe ce se desfășoară în SLM cu un singur AE - descărcarea electrică singulară.

Indiferent de nivelul ierarhic al sistemului spațiu de lucru (SLM, SLE, SL), procesul de generare a suprafeței cu îndepărtare de substanță de la obiectul prelucrării OP cuprinde /46, 84, 101, 255, 328/ două grupe de procese fizico-chimice distincte:

a) separarea materialului excedentar de la suprafață sau din OP, cu constituire a deșeurilor DTT (în urma ruperii legăturilor interatomice între OP și DTT); b) evacuarea de la suprafața OP și din SL a deșeurilor DTT rezultate. Complexitatea acestor procese este maximă la nivelul sistemului SL al SATO.

În cazul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică complexitatea maximă a proceselor de transformare necesare pentru generarea suprafeței piesei, apare la prelucrarea cu copierea formei electrodului. În acest caz, la acțiunea în masă a descărcărilor electrice {AE} în impuls, desfășurată în spațiul de lucru SL al SATO, apare o interacțiune între componentele mulțimii {AE} cu atât mai mare cu cât interstițiul ET-OP are o grosime δ mai mică, o formă mai complexă, respectiv cu cât este mai mică durata puzei dintre două impulsuri de curent succesive.

În figura 3.5 se sintetizează pe baza cunoștințelor actuale /189, 217, 252, 293, 393, 420/ principalele grupe de procese și conexiuni ce apar la acțiunea în masă a descărcărilor electrice în cazul prelucrării electroerozive în regim stabil (fără impulsuri de mers în gol, fictive prin punți conductoare sau de scurtcircuitare, ce pot apărea la funcționare în regim tranzitoriu al regulatorului de avans RA, programat de către operator prin transmiterea informației I_{2RA}).

La funcționarea în regim stabil RA, generatorul de impulsuri comandate GI absoarbe de la rețeaua electrică energia primară E_{1GI} și generează în spațiul de lucru SL cu o frecvență f_1 conform programării I_{2GI} , un număr total de N descărcări electrice AE (impulsuri de curent) cu anumite caracteristici, într-o anumită perioadă de timp Δt :

$$N = N_{pp} + N_{pm} + N_{fg} \quad (3.3)$$

în care: N_{pp} - descărcări pentru prelucrare propriu-zisă, care furnizează energie de efect pentru piroliza lichidului de lucru LL cu constituirea deșeurilor gazoși D_{gaz} și a produselor pirolizei D_{pir} , pentru separarea de la obiectul OP și electrodul ET a deșeurilor solide $D_{sol(OP+ET)}$, pentru procese de depunere a unor pelicule solide la ET și OP, pentru procese de evacuare naturală a deșeurilor din S datorită efectelor dinamice ale undelor de șoc {U.S.} ale descărcărilor electrice;

N_{pm} - descărcări pentru mărunțirea și dispersarea deșeurilor solide D_{sol} care formează local aglomerări A_{sol} în interstițiul I dintre ET și OP, în urma creșterii rezistenței pe traseul de evacuare în afara SL (de exemplu, datorită creșterii ariei suprafeței și adâncimii de prelucrare la perechea ET-OP, datorită micșorării grosimii δ a interstițiului etc.), respectiv pentru separare de la ET a deșeurilor solidi $D_{sol}(ET)$ și în mică măsură pentru procese de piroliză a LL, depunere de pelicule, evacuare;

N_{fg} - descărcări fictive prin aglomerările de gaz A_{gaz} care se formează local în interstițiu (de exemplu, datorită micșorării - față de optimul pentru regimul de lucru concret - a ariei suprafeței și adâncimii de prelucrare la ET-OP) și produc numai piroliza LL.

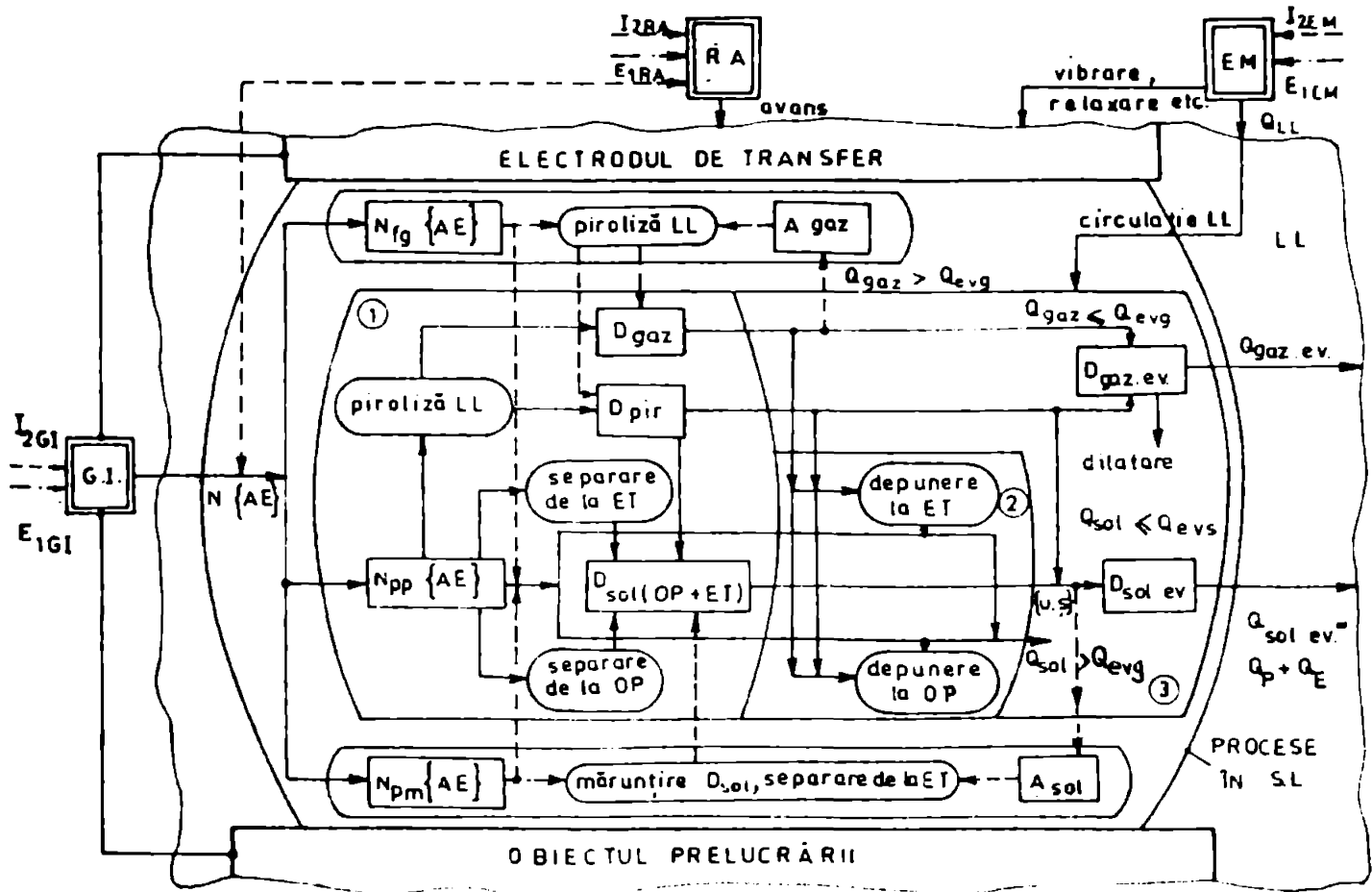


Fig.3.5.Principalele grupe de procese fizico-chimice din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului.

1.separare deșeu; 2.depunere pelicule; 3.evacuare deșeu.

În perioada de timp Δt , în spațiul de lucru SL cu grosimea δ mică a interstițiului se desfășoară deci procese complexe de separare de substanță de la OP și ET, de piroliză a LL și depunere a unor pelicule solide la ET și OP, urmate de procese de evacuare din I a deșeurilor solide $D_{sol.ev}$ respectiv gazoase $D_{gaz.ev}$. În condiții optime de desfășurare a proceselor în SL, între debitul de

producere a deșeurilor solide Q_{sol} și debitul Q_{evs} de evacuare a acestora din I există egalitatea :

$$Q_{sol} = Q_{ev.s} \quad (3.4)$$

respectiv analog pentru deșeuri gazoase :

$$Q_{gaz} = Q_{evg} \quad (3.5)$$

Dacă din cauza creșterii ariei suprafeței și adâncimii prelucrării (față de optimul corespunzător regimului de lucru dat) apare inegalitatea :

$$Q_{sol} > Q_{ev.s} \quad (3.6)$$

intră în funcție procesul de reacție inversă internă prin intermediul descărcărilor de mărunțire și dispersare $N_{pm} \{AE\}$, proces care în timp reduce relativ numărul $N_{pp} \{AE\}$, respectiv valoarea Q_{sol} și reface astfel egalitatea (3.4).

Dacă din cauza micșorării ariei suprafeței și a creșterii adâncimii prelucrării (față de optimul corespunzător regimului de lucru dat) se încălzește cea mai mare parte a suprafețelor interstițiului activ la $100^{\circ}C < T < 400^{\circ}C$ și apare inegalitatea :

$$Q_{gaz} > Q_{evg} \quad (3.7)$$

intră în funcțiune procesul de reacție inversă internă prin intermediul descărcărilor fictive în gaz $N_{fg} \{AE\}$, proces care în timp reduce relativ numărul $N_{pp} \{AE\}$, respectiv valoarea Q_{gaz} și reface astfel egalitatea (3.5).

La reducerea grosimii δ a interstițiului ambele reacții inverse interne ce apar în SL acționează corelat pentru a reface egalitățile (3.4) și (3.5).

Trebuie remarcat faptul că reacțiile inverse interne din SL sînt relativ lente și că fără procesul reacției inverse externe rapide realizată de către regulatorul de avans RA (care menține relativ constantă grosimea δ a interstițiului) procesul prelucrării prin eroziune electrică nu s-ar putea desfășura stabil. La stabilizarea procesului prelucrării contribuie important și evacuarea artificială din I a deșeurilor solide și gazoase, realizată de echipamentul mecanic și hidraulic EM programat de către operator prin transmiterea informației I_{2EM} . Echipamentul EM absoarbe de la rețeaua electrică energia primară E_{1EM} și realizează circulația LL cu un debit Q_{LL} sau vibrarea sau relaxarea EF cu anumiți parametri etc.

Modelul grupelor de procese fizico-chimice la prelucrarea prin eroziune electrică clarifică desfășurarea modificărilor carac-

teristicilor tehnologice ale prelucrării cu copierea formei și legătura strînsă între parametrii regimului de lucru și geometria interstițiului. Acest model stă la baza dezvoltării modelelor de conducere automată adaptivă a regimurilor de lucru și a subsistemelor automate adaptive tot mai perfecționate ce se realizează începînd din anul 1970.

3.3.2. Probleme rezolvate ale prelucrării dimensionale prin eroziune electrică.

În cadrul prelucrării dimensionale prin eroziune prelucrarea electroerozivă a avut și are încă pondera cea mai mare a aplicării industriale, apreciată la 65...70 % /130, 328/. În țările dezvoltate industrial cca. 5 % din parcul de mașini unelte al întreprinderilor constructoare de mașini, aparate, SDV-uri îl constituie utilajele de prelucrare prin eroziune electrică /21, 53/. Acest fapt se datorește atît producerii în serie a primelor mașini de prelucrare prin eroziune electrică încă din anul 1947, cît și posibilităților tehnologice ale metodei /88, 171, 206, 213, 293, 314, 468/.

Avantajele prelucrării dimensionale prin eroziune electrică sînt în principal următoarele: prelucrabilitatea oricăror materiale electroconductoare, independent de proprietățile lor fizico-chimice; posibilitatea generării suprafețelor de orice formă de la dimensiuni miniaturale ($\varnothing 0,003$ mm) la dimensiuni de 10 m^2 ; utilizarea unor obiecte de transfer (electrozi) din materiale cu duritate și rezistență mecanică relativ redusă; realizarea prelucrării dimensionale fără contact între OT și OP, cu acțiune mecanică neglijabilă asupra obiectului prelucrării; productivitate și precizie ridicată a prelucrării; utilaje cu structuri cinematice relativ simple și grad ridicat de automatizare; economicitate ridicată, în-deosebi la prelucrarea unor materiale cu proprietăți excepționale și a unor suprafețe de formă complexă.

Dezavantajele metodei sînt în principal: necesitatea prelucrării în mediu lichid dielectric, ceea ce complică construcția și servirea utilajului; uzura relativ ridicată a electrozilor și ponderea mare a costului acestora (50...60 %) în costul prelucrării; productivitatea și precizia prelucrării depind de o mulțime de parametri interdependenți, încă greu de controlat; consumul specific de energie este încă foarte ridicat.

Ca la orice metodă tehnologică, progresul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică a condus la creșterea continuă

a performanțelor și domeniului de aplicare industrială, prin dezvoltarea avantajelor și atenuarea dezavantajelor. Se poate spune că după trei decenii de dezvoltare și aplicare industrială metoda începe să se apropie de mulțimea metodelor clasice de prelucrare dimensională, fapt dovedit de reducerea relativă a ratei de creștere a brevetelor, a producției utilajelor electroerozive, începând din 1975 /15, 180, 293/, de nivelul tehnic și calitativ deosebit de ridicat al utilajelor produse în prezent, de performanțele tehnologice și economice deosebite ale prelucrărilor realizabile, indiferent de metoda de generare a suprafeței la obiectul prelucrării /216/.

Se estimează că în prezent pe plan mondial numărul mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică instalate, depășește cifra de 100.000 bucăți. În ultimii 5 ani utilajele competitive prezintă un grad avansat de unificare al tuturor subsansamlurilor, inclusiv al echipamentelor de completare (capete universale sau specializate, mese rotative, dispozitive de instalare etc.). Sub-sistemele funcționale prezintă performanțe și siguranță înaltă. La prelucrarea cu copierea formei electrodului generatoarele de impulsuri realizează la prelucrări monocanal productivități maxime de ordinul $50.000 \text{ mm}^3/\text{min}$ pentru OP din oțel și, într-o gamă largă de regimuri electrice, uzuri relative ale electrodului de 0,01...1%. Prelucrarea multicanal a rezolvat în ultimul timp aducerea productivității prelucrării electroerozive la nivelul prelucrării prin eroziune electrochimică.

Sistemele de conducere adaptivă, comandă program și cu calculator permit optimizarea avansată a proceselor de prelucrare, reducând la minim intervenția operatorului. Perfecționarea părților mecanice ale utilajelor, a mediilor de lucru dielectrice, a materialelor și fabricării electrozilor a contribuit în plus la realizarea unor precizii de prelucrare de ordinul 0,001...0,003 mm și a unor rugozități a suprafețelor $R_a = 0,3...0,4 \mu\text{m}$, la regimuri de finisare /14, 15, 18, 28, 31, 33, 38, 90, 127, 146, 170, 173, 178, 183, 194, 198, 216, 219, 278, 296, 314, 321, 322, 335, 359, 349, 350, 352, 360, 361, 433, 436, 437/.

Cu toate acestea, în literatura de specialitate /15, 65, 80, 88, 104, 180, 184, 216, 217, 247, 328, 337, 338, 342, 388/ se consideră ca probleme de rezolvat în viitor următoarele:

a) la utilaje de prelucrare electroerozivă: perfecționare funcțională generală, diversificare a tipodimensiunilor și gradului de specializare, creștere a gradului de unificare a subsiste-

melor; extinderea posibilităților de prelucrare a suprafețelor atât prin dimensiuni miniaturale cât și spre dimensiuni mari; perfecționarea subsistemelor mecanice prin diversificarea largă a metodelor de generare a suprafețelor și raționalizarea constructiv-funcțională a acționărilor ajutătoare; perfecționarea generatoarelor de impulsuri prin lărgirea gamei regimurilor de lucru cu uzare practic nulă a electrodului, prin dezvoltarea sistemelor de prelucrare multicanal; îmbunătățirea subsistemelor de pregătire și circulație a mediului de lucru dielectric, perfecționarea sistemelor de conducere automată adaptivă, cu program și cu calculator, dezvoltarea automatizării complete a utilajului;

b) la elementele spațiului de lucru: aprofundarea în continuare a cercetărilor teoretico-experimentale ale proceselor din spațiul de lucru; cercetarea și asimilarea în producție curentă a noi materiale pentru electrozi și lichide de lucru, inclusiv lichide cu adaosuri speciale care să determine îmbunătățirea caracteristicilor tehnologice; îmbunătățirea caracteristicilor metodelor existente și introducerea de noi metode pentru fabricarea electrozilor, care să asigure îndeosebi precizie, identitate ridicată și economicitate sporită; trecerea pe calculator a proiectării electrozilor, îndeosebi pentru cazul generării suprafeței prin rulare; creșterea preciziei prelucrării la noile utilaje produse, respectiv de 1,5...2 ori la prelucrarea cu copierea formei; dublarea productivității prelucrării; îmbunătățirea netezimii suprafeței cu 1...2 clase;

c) la pregătirea fabricației: perfecționarea proceselor tehnologice și elaborarea de normative unitare generale, în acest domeniu; proiectarea proceselor tehnologice pe calculator; extinderea poliservirii utilajelor și organizarea de ateliere automatizate pentru prelucrare prin eroziune electrică; lărgirea perseverentă a domeniului de aplicare a prelucrării electroerozive, atât în producția de bază cât și în producția auxiliară.

In România aplicarea industrială a prelucrării prin eroziune electrică datează încă din 1950. În prezent numărul mașinilor instalate depășește cifra de 300 buc. Cercetările efectuate în acest domeniu la Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara încă din anul 1962, la Universitatea din Brașov după 1965 și la ICPTCM București după 1968, au permis realizarea mai multor prototipuri originale de mașini pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului. Din 1977 Intreprinderea Electrotimiș Timișoara produce mașini universale de gabarit

mijlociu pentru prelucrarea cu copierea formei, iar începînd din anul 1980 va fabrica în serie și mașini de prelucrare cu electrod filiform, ambele de concepție românească. A fost finanțat /328/ un program complex de cercetare-proiectare-asimilare în producția de serie pentru utilaje de prelucrare dimensională prin eroziune. În cadrul acestui program urmează ca să se dezvolte și să se diversifice în primul rînd producția utilajelor de prelucrare prin eroziune electrică, perfecționarea tehnologiilor, utilizarea mai rațională a parcului de mașini existent.

În principiu, problemele ce le au de rezolvat cercetătorii, proiectanții, producătorii de utilaje și utilizatorii din România ai prelucrării electroerozive sînt aceleași ca cele pe plan mondial.

Existența unui parc de utilaje de prelucrare prin eroziune electrică și perspectiva creșterii lui importante în viitor, ridică pentru utilizatorii din România cîteva probleme prioritare în următorii 5...10 ani :

a) proiectarea proceselor tehnologice optime de prelucrare prin eroziune electrică,

b) optimizarea construcției și fabricației electrozilor, în condițiile unei game suficient de largi de materiale pentru electrozi și a diversificării procedeelor de fabricare a electrozilor.

La rezolvarea unor aspecte ale acestor probleme de pregătire a fabricației prin eroziune electrică, lucrarea de față urmărește să aducă o modestă contribuție, în continuare.

II. CERCEȚARI PRIVIND SISTEMUL ELECTROD DE TRANSFER PENTRU PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU COPIEREA FORMEI

4. Funcția și structura electrodului de transfer pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrică.

4.1. Funcția electrodului de transfer.

Pe baza analizei necesităților tehnico-economice, a categoriilor de cerințe funcționale cărora le răspunde /301, 303, 314/ se poate considera că funcția globală a electrodului de transfer ET la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei este asigurarea transferului direct de energie, informație și lichid de lucru în spațiul de lucru SL al prelucrării.

Ca subsistem al spațiului de lucru, electrodul ET satisface de fapt mai multe categorii de cerințe funcționale, prin funcțiile componente ale funcției globale:

a). Performanțe, cărora le corespund funcțiile de performanță :

a1) cerințe funcționale ale SL, cărora le corespund funcțiile finale ale ET, pentru care a fost constituit;

a2) cerințe funcționale ale SATO și mediului SATO (vezi cap.2) cărora le corespund funcțiile colaterale ale ET ;

b). Cerințe funcționale ale însăși ET, cărora le corespund funcțiile intermediare (auxiliare) ale ET.

În tabelul 4.1 se sistematizează funcțiile ET pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrică, ca rezultat al analizei funcționale efectuate pentru cazul prelucrării cu copierea formei. Cu unele modificări (omisiunea funcțiilor F7, F8, F9 și F5I) funcțiile descrise în tabelul 4.1 sînt identice cu cele ale electrodului filiform.

Trebuie remarcat faptul că majoritatea funcțiilor finale și intermediare (cu excepția F1, F5, F11, F12, F5I) sînt determinate de proprietățile de material ale ET și de procesele ce se desfășoară în spațiul de lucru (vezi § 3.3.1).

Determinarea importanței funcțiilor electrodului ET se face cu metoda consacrată /301, 308/ prin stabilirea ponderii P_f a fiecărei funcții în funcția globală a ET (tabelul 4.2).

Tabelul 4.1.

Funcțiile electrodului de transfer pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrică

a. Funcții de performanță	b. Funcții intermediare, cerute de realizarea funcțiilor de performanță.
<p>a1. funcții finale</p> <p>F1. stocarea inițială precisă de informație macrogeometrică și microgeometrică pentru suprafeța reală a piesei (dimensiuni, formă, poziție reciprocă a suprafețelor active componente, rugozitate) (mm)</p> <p>F2. transferul cu pierderi reduse a informației în SL (uzură relativă δ redusă)</p> <p>F3. transferul cu pierderi reduse a energiei electrice secundare în SL (randament η_t)</p> <p>F4. asigurarea posibilităților de recondiționare convenabilă a suprafeței active a ET.</p> <p>F5. asigurarea evacuarii bune a deșeurilor tehnologice din interstițiul ET-OP</p> <p>F6. asigurarea unei productivități ridicate a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică (productivitate relativă ψ ridicată)</p>	<p>a2. funcții colaterale</p> <p>F7. asigurarea poziționării rapide și precise și rapide în dispozitive tipizate SATO</p> <p>F8. asigurarea fixării sigure și rapide în dispozitive tipizate SATO.</p> <p>F9. asigurarea conectării sigure și rapide la dispozitive tipizate ale ieșirii generatorului de impulsuri al SATO</p>
<p>F10. asigurarea preciziei dimensionale și a poziționării componentelor ET (mm)</p> <p>F11. asigurarea rigidității mecanice corespunzătoare componentelor ET (mm/daN)</p> <p>F12. asigurarea unei durabilități electroerozive ridicate a materialului activ al ET (%)</p> <p>F13. asigurarea unei termoconductibilități ridicate a componentelor pasive ale ET (w/°K)</p> <p>F14. asigurarea unei electroconductivități ridicate a componentelor active ale ET (S/m)</p> <p>F15. asigurarea prelucrabilității convenabile a materialului componentelor active ale ET</p> <p>F16. asigurarea circulației favorabile a lichidului de lucru LL prin corpul ET</p> <p>F17. asigurarea unui coeficient de polaritate favorabil al perechii de materiale ET-OP în LL (C_p)</p>	<p>F10. asigurarea preciziei dimensionale și a poziționării componentelor ET (mm)</p> <p>F11. asigurarea rigidității mecanice corespunzătoare componentelor ET (mm/daN)</p> <p>F12. asigurarea unei durabilități electroerozive ridicate a materialului activ al ET (%)</p> <p>F13. asigurarea unei termoconductibilități ridicate a componentelor pasive ale ET (w/°K)</p> <p>F14. asigurarea unei electroconductivități ridicate a componentelor active ale ET (S/m)</p> <p>F15. asigurarea prelucrabilității convenabile a materialului componentelor active ale ET</p> <p>F16. asigurarea circulației favorabile a lichidului de lucru LL prin corpul ET</p> <p>F17. asigurarea unui coeficient de polaritate favorabil al perechii de materiale ET-OP în LL (C_p)</p>

Tabelul 4.2.

Ponderea funcțiilor electrodului de transfer în funcția globală

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
F2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F3	1	1	1	0	0	0	0	0	0
F4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F5	1	1	1	0	1	0	0	0	0
F6	1	1	1	0	1	1	1	0	1
F7	1	1	1	0	1	0	1	0	0
F8	1	1	1	0	1	1	1	1	1
F9	1	1	1	0	1	0	1	0	1
p_F	8	9	7	1	6	3	5	2	4

Importanța descrescătoare a funcțiilor ET este deci: F2; F1; F3; F5; F7; F9; F6; F8; F4.

Realizarea funcției F2 (uzură relativă redusă - ideal nulă), așa cum s-a arătat la § 3.3.2, constituie unul din obiectivele prioritare ale cercetării, proiectării și producției de utilaje actuale, vizînd atenuarea și înlăturarea principalului dezavantaj al prelucrării prin eroziune electrică. Cercetările sînt îndreptate deocamdată preponderent spre elucidarea procesului fizico-chimic complex al uzării ET (prelevare-depunere) și găsirea căilor de control ale acestuia /25, 27, 185, 197, 217, 252, 314, 382, 388, 420, 423/, spre perfecționarea materialelor pentru ET. Sînt însă puține cercetările privind uzura ET la nivel macroscopic, fapt oarecum paradoxal. Drept consecință, în literatură sînt definite puține variabile de ieșire pentru procesul de uzare, este rămas în urmă studiul influenței factorilor geometrici, modelele matematice ale generării suprafeței la prelucrarea cu copierea formei nu sînt încă satisfăcătoare etc.

Realizarea funcției F1 (precizie dimensională a suprafeței active a ET) este un obiectiv important al proceselor tehnologice de fabricare a ET.

4.2. Structura electrodului de transfer.

Adoptînd ca prim punct de vedere transferul de informație

și ținând seama că electrodul poate avea o structură mono- sau multicomponentă, se face în figura 4.1 o distincție funcțională a componentelor ET, corelată cu tabelul 4.1.

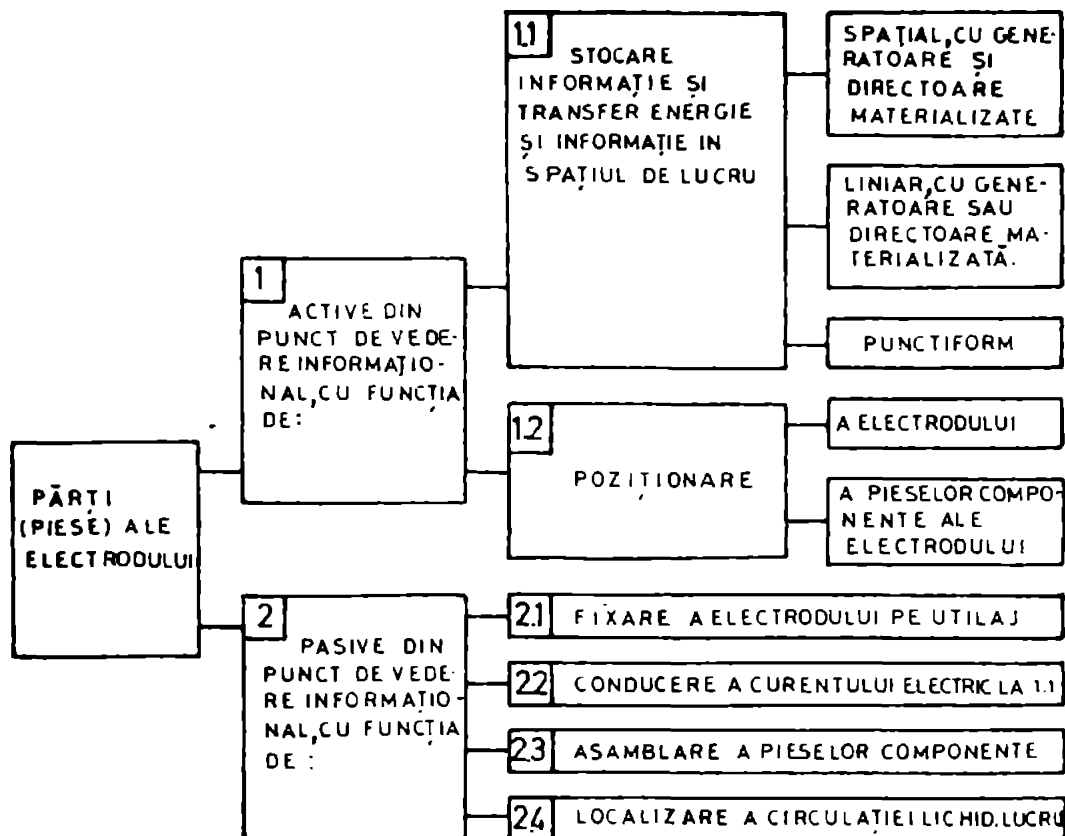


Fig.4.1.Componentele funcționale ale electrodului de transfer pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrică.

Din punct de vedere al transferului de energie componentele ET trebuie de asemeni separate în active (componentele (1.1) și parțial (2.1), figura 4.1) și pasive în procesul de prelucrare prin eroziune electrică.

Componentele funcționale precizate în figura 4.1 descriu construcția de principiu a oricărui electrod. În cazul structurii celei mai simple (electrod filiform) unica componentă funcțională a ET este cea numerotată 1.1.

Componenta (1.1) realizează funcțiile finale ale electrodului și dependent de metoda de generare a suprafeței stochează-transmite informație în trei moduri: spațial, liniar, punctiform.

Analiza modurilor de generare a suprafeței reale /88,213, 314/ demonstrează marea diversitate constructivă a electrozilor pentru prelucrarea dimensională prin eroziune electrică.

Din punct de vedere al componentei principale (1.1) electrozii se clasifică conform figurii 4.2. Construcțiile monobloc (monomaterial) sînt justificate la complexități și gabarite relativ reduse ale suprafeței, în opoziție cu construcțiile compuse

ale electrozilor.

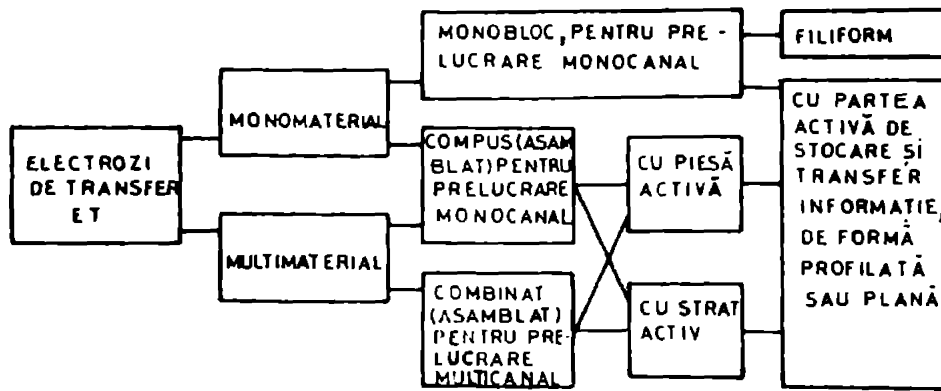


Fig.4.2. Clasificarea constructivă a electrozilor de transfer din punct de vedere al componentei principale

La prelucrarea cu copierea formei, în cazul gabaritelor sau/și complexităților mari ale suprafeței reale a piesei, prezintă eficiență deosebită electrozii de transfer cu strat activ /258/.

4.3. Calitatea electrodului de transfer.

Nivelul calității totale a unui produs înglobează valorile tuturor caracteristicilor (indicatorilor) de calitate, adică valorile variabilelor de performanță ale produsului și procesului realizat de acesta. /301/. Performanțele de calitate ale produsului pot fi tehnice (1. statice: caracteristici structural-funcționale ale produsului, ergonomice, cu aspect social; 2. dinamice, însumate de disponibilitatea $A(t)$ a produsului) sau comerciale (1. economice: productivitate, randament, costuri etc.; 2. estetice: aspect, grad de finisare, eleganța formelor etc.).

Fiind un produs cu structură relativ simplă și funcționând numai în cadrul spațiului de lucru SL al SATO pentru prelucrarea electroerozivă, calitatea totală a electrodului ET poate fi analizată și estimată numai în cadrul unui SATO concret. Dacă indicatorii de calitate sînt exprimați cantitativ, calitatea totală a ET se estimează fără dificultate cu metodele existente în literatură /30, 59/.

Din mulțimea variabilelor de performanță (vezi § 2.1) este însă nesatisfăcătoare exprimarea cantitativă a variabilelor pentru procesul de uzare și uzura ET, respectiv a indicatorilor de calitate referitori la disponibilitatea ET. Acest fapt crează dificultăți în estimarea nivelului calității totale a electrodului și impune cercetări speciale în domeniu, în primul rînd în ce privește procesul de uzare considerat la nivel macroscopic.

5. Procese și modele ale proceselor de uzare a
electrodului de transfer la prelucrarea prin
eroziune electrică cu copierea formei.

5.1. Uzură, durabilitate și coeficient de polaritate
la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică.

Înainte de a analiza mărimile ce caracterizează la nivel macroscopic uzarea și uzura electrodului, este necesar să se facă distincție între noțiunile de uzură a electrodului și durabilitate la eroziune electrică a unui material electroconductor, ultima în condiții date ale spațiului de lucru elementar SLE (combinație de materiale ET-OP-LL; polaritate a conectării ET și OP la generatorul de impulsuri GI; formă și caracteristici ale impulsurilor de tensiune și de curent; grosime δ a interstițiului activ; viteză de circulație în interstițiu a lichidului de lucru LL etc.).

Așa cum s-a arătat la § 3.3.1 (fig.3.5), uzura electrodului este rezultatul procesului de uzare (prelevare de la ET + depunere la ET) și poate fi definită de modificarea formei și reducerea diferențiată a dimensiunilor părții active a electrodului ET în decursul procesului de prelucrare a obiectului prelucrării OP. De fapt, uzura este una din consecințele la ET a conexiunilor de interacțiune și de transformare posibile în spațiul de lucru. În anumite condiții /213, 217, 333, 410/ aceleași categorii de conexiuni realizează fie uzură nulă, fie încărcări la electrod (modificări de formă și creșterea diferențiată a dimensiunilor părții active a electrodului în decursul procesului de prelucrare a OP).

Pentru a se distinge de uzură, care este determinată în mod esențial și de factori geometrici /6, 304/ ce îngreunează mai mult sau mai puțin evacuarea deșeurilor solide D_{sol} din interstițiu, durabilitatea la eroziune electrică a unui material electroconductor exprimă comportarea la nivel macroscopic a acestuia, independent de factorii geometrici ai prelucrării ET-OP.

Trebuind deci să caracterizeze, în condiții date, procesele de separare (prelevare) de la ET, piroliză a LL și depunere (peliculizare) la ET, este necesar ca durabilitatea la eroziune electrică a materialului ET să fie determinată în absența influenței evacuării deșeurilor D_{sol} cauzată de geometria interstițiului, deci cu electrozi ET-OP având suprafețe active plane și în absența în interstițiu a descărcărilor de mărunțire și dispersare (fig.3.5) :

$$N_{pm} \{AE\} = N_{fg} \{AE\} = 0 \quad (5.1)$$

Atunci, descărcările de prelucrare propriu-zisă $N_{pp} \{AE\}$ se vor distribui aleatoriu în interstițiu.

În cazul când nu sînt îndeplinite condițiile de depunere a peliculelor protectoare la suprafața ET apare un caz particular al durabilității, pentru care, din motive de distincție, se propune denumirea de rezistență la eroziune electrică a materialului electroconductor.

Pentru a exclude influența perturbatorie a încălzirii OP și ET asupra rezultatelor încercării la durabilitate electroerozivă, semnalată de Zlobin /421/, este necesar să se realizeze în interstițiu densități de curent /213, 313, 314, 325, 456, 458/ :

$$j_{med} = (0,5 \dots 15) \text{ A/cm}^2,$$

corelate cu ariile suprafețelor de interacțiune ET-OP și cu modul de evacuare a deșeurilor din interstițiu. Se impune ca proiecția suprafețelor active ale ET-OP pe un plan perpendicular pe direcția avansului ET să fie, în cazul determinării durabilității la eroziune electrică /148, 294, 410, 456, 457, 458/ :

$$A_{tE} = (20 \dots 500) \text{ mm}^2$$

Inercarea la duritate electroerozivă se poate face cu sau fără circulația lichidului de lucru LL. În primul caz este necesar /148, 359, 456, 458/ ca în interstițiul activ să se realizeze refularea LL cu o presiune:

$$P_{LLI} = (0,05 \dots 0,3) \text{ daN/cm}^2$$

În al doilea caz este necesar ca prin forma și dimensiunile ET și OP să se excludă posibilitatea aglomerării în interstițiu a unor deșeuri solide sau gazoase (A_{sol} , A_{gaz} conform fig.3.5), adică este necesar să se respecte egalitatea (5.1). În cazul încercării la durabilitate electroerozivă fără circulația lichidului de lucru realizarea egalității (5.1) presupune efectuarea încercării la suprafețe de interacțiune plane cu arie minimă /304, 421/ :

$$A_{tE} = (20 \dots 30) \text{ mm}^2$$

sau cel puțin cu rază de evacuare r_{ev} minimă /213/. Pentru a elimina posibilitatea de apariție a traseelor de evacuare verticale, generatoare ale aglomerărilor A_{sol} , se impune ca formele și ariile secțiunilor normale pe direcția de avans, efectuate prin ET (A_{nE}) și prin OP (A_{nOP}) să fie identice. Electrozii ET și OP utilizați în acest caz pentru încercări pot fi cilindrici ($d_{\perp} = 5 \dots 6 \text{ mm}$), tubulari sau paralelipipedici (grosime redusă $\delta_{\perp} = 2 \dots 4 \text{ mm}$).

Durata încercării la durabilitate electroerozivă se recomandă /148/ :

$$t_{id} = (5 \dots 15) \text{ min.}$$

Adâncind în continuare analiza comportării materialelor electroconductoare în procesul eroziunii electrice, se remarcă faptul că polaritatea conectării ET și OP la generatorul de impulsuri GI determină în toate cazurile, inclusiv la materialele identice ale ET și OP, eroziune (prelevare) mai mare la unul din electrozi /213, 314/. Evident acest fenomen apare și în cazul când electrodul prezintă la suprafața activă o peliculă depusă în urma proceselor desfășurate în spațiul de lucru SL (fig.3.5), prelevarea de material de la ET în timpul încercării făcându-se în primul rând din pelicula depusă anterior, cu un alt efect de polaritate decât în cazul materialului electroconductor de bază al ET. Deci, la determinarea efectului de polaritate, pentru a cunoaște numai comportarea la procese de separare (prelevare) prin eroziune electrică a perechii de materiale încercate, se impune eliminarea posibilității ca în timpul încercării să se preleveze material din două straturi (peliculizat și bază), adică se impune eliminarea din SL a proceselor de depunere la ET și la OP.

Exprimând de fapt repartiția energiei de efect E_3 (E_{3ET} și E_{3OP} cf.fig.2.3) între electrozi efectul de polaritate la eroziune electrică este determinat de un număr mare de factori: polaritatea conectării la generatorul de impulsuri, caracteristicile fizico-chimice ale materialelor electrozilor, caracteristicile fizico-chimice ale mediului de lucru lichid dielectric, grosimea interstițiului dintre electrozi, forma și caracteristicile impulsurilor de tensiune și de curent, geometria canalului descărcării /35, 180, 185, 195, 197, 213, 251, 262, 271, 279, 284, 294, 314, 340, 371, 398/. Unele cercetări /279, 154, 197/ au demonstrat importanța hotărâtoare pentru efectul de polaritate a raportului dintre potențialele de ionizare a materialelor celor doi electrozi, respectiv a raportului dintre numărul de electroni și ioni la descărcarea în impuls cu caracteristici date.

Se poate conchide că (tabelul 5.1) :

a). Uzura electrodului este o consecință a proceselor de uzare a ET desfășurate în întreg spațiul de lucru SL (fig.3.5), adică o consecință a tuturor proceselor de separare-depunere la ET, de mărunțire și evacuare a deșeurilor D_{sol} . Uzura poate fi exprimată prin diverse mărimi (variabile) de măsurare tehnologice, globale sau locale.

Tabelul 5.1.

Caracterizarea comportării la eroziune electrică a părții active a electrodului de transfer și a unei perechi de materiale electroconductoare, în cazul mediului de lucru lichid dielectric

Nr. crt.	Consecință (efect) sau mărime	Caracteristici ale descărcării electrice	
		tip de descărcări în interstițiul ET-OP	mod de acțiune
1.	uzură a electrodului de transfer	toate tipurile posibile N_{pp} ; N_{pm} ; N_{fg}	în masă
2.	durabilitate la eroziune electrică a unui material electroconductor.	numai descărcări N_{pp} ce realizează separare și depunere	
3.	rezistență la eroziune electrică a unui material electroconductor	numai descărcări N_{pp} ce realizează separare	
4.	coeficient de polaritate pentru o pereche de materiale date	numai descărcare N_{pp} ce realizează separare elementară	singulară

b). Durabilitatea la eroziune electrică a unui material electroconductor este o caracteristică, o consecință a proceselor desfășurate în spațiul de lucru elementar SLE (definit la § 3.2.2), adică numai a proceselor de separare-depunere la ET și de evacuare fără mărunțire a D_{sol} .

c). Rezistența la eroziune electrică a unui material electroconductor este un caz particular al durabilității electroerozive, când în SLE se desfășoară numai procese de separare de la ET (nu sînt îndeplinite condițiile de depunere a peliculelor protectoare la suprafața ET).

d). Coeficientul de polaritate este o caracteristică numai a proceselor de separare (prelevare) ce se desfășoară în spațiile de lucru (corespunzătoare descărcărilor) singulare SLM, fiind excluse procesele de peliculizare a a electrozilor și procesele de mărunțire a deșeurilor solide. Coeficientul de polaritate poate fi considerat o variabilă intermediară pentru procesele din SLE și SL. Evident, în virtutea apartenențelor SL {SLE {SLM}}, efectul de polaritate pentru o anumită pereche de materiale supuse eroziunii electrice în condiții date, determină parțial atât rezistența la eroziune electrică, durabilitatea la eroziune electrică, cât și uzura electrodului de transfer.

Uzura, durabilitatea la eroziune electrică și rezistența

la eroziune electrică se pot exprima global prin raportul dintre reducerile de volum la electrozii supuși prelucrării sau încercării.

Durabilitatea la eroziune electrică a unui material electroconductor (ET) se exprimă /421/ prin relația :

$$\Psi_o = \frac{V_{Po}}{V_{Eo}} = \frac{1}{\gamma_o} \quad (5.2)$$

în care: V_P /mm³/ - volumul de material prelevat de la obiectul prelucrării OP; V_E /mm³/ - volumul uzării electrodului ET; o - indice care marchează realizarea condițiilor pentru respectarea egalității (5.1), în cazul electrozilor OP-ET avînd suprafețe active plane.

Intotdeauna se realizează inegalitatea :

$$V_E < V_P \quad (5.3)$$

cea ce, funcție de efectul de polaritate, impune conectarea ET fie drept catod (polaritate directă) fie drept anod (polaritate inversă). La orice determinare a durabilității electroerozive se precizează detaliat în ce condiții, cu ce parametri s-a desfășurat încercarea.

Coefficientul de polaritate este definit pentru o pereche de materiale electroconductoare /314/ :

$$C_p = \frac{\gamma_{o-}}{\gamma_{o+}} = \frac{V_{Eo-}}{V_{Po+}} \cdot \frac{V_{Po-}}{V_{Eo+}} \quad (5.4)$$

în care: γ_{o-} - uzura relativă volumică a electrodului la polaritate directă, în condițiile respectării egalității (5.1) și ale absenței depunerii de pelicule protectoare pe ET; γ_{o+} - uzura relativă volumică a electrodului la polaritate inversă, în condițiile menționate. Dacă $C_p \ll 1$ este optimă polaritatea directă, dacă $C_p \gg 1$ este optimă polaritatea inversă. Deși este determinat de procese microscopice, desfășurate în spațiul de lucru microscopic SLM al unei descărcări singulare, în practică C_p se determină prin încercări de durată, deci prin însumarea efectelor descărcărilor singulare, desfășurate în condițiile menționate. În conformitate cu cele expuse în tabelul 5.1 ar fi necesar ca determinarea C_p să se facă prin încercări la descărcări singulare.

Studiul efectuat mai sus permite ca în tabelul 5.2 să se sintetizeze condițiile de bază ale încercării la durabilitate

electroerozivă. Acestea pot fi luate în considerare nu numai în practica determinărilor, ci și la elaborarea unui standard în acest domeniu.

Tabelul 5.2.

Parametri geometrici și de regim pentru determinarea durabilității la eroziune electrică a unui material electroconductor.

Mărimi	Valori limită pentru cazul evacuării din interstițiu a deșeurilor solide și gazoase	
	prin circulația forțată a lichidului de lucru	b) natural
j_{med} /A/cm ² /	0,5 ... 15	0,5 ... 15
A_{tE} /mm ² /	50 ... 500	20...30 sau $r_{ev.min}$
r_{ev} /mm/	$d_E/6$	$d_E/6 = g_E/4 \rightarrow min$
d_E /mm/	$(\frac{4}{\pi} A_{tE})^{1/2}$	5 ... 6
g_E /mm/	$f(A_{tE})$	2 ... 4
A_{nE}/A_{nP}	1	1
p_{LLI} /daN/cm ² /	0,05 ... 0,3	-
t_{id} /min/	15	5 ... 15

Observații:

- semnificația notațiilor: j_{med} - densitatea de curent în interstițiu; A_{tE} - aria proiecției suprafeței active a electrodului pe un plan perpendicular pe direcția mișcării de avans; r_{ev} - raza de evacuare a deșeurilor; d_E - diametrul electrodului; g_E - grosimea electrodului paralelipipedic; A_{nE}/A_{nP} - aria secțiunii normale pe direcția de avans a ET/OP; p_{LLI} - presiunea de refluxare a lichidului de lucru în interstițiu; t_{id} - durata încercării la durabilitate electroerozivă;
- pentru a se putea mări valorile A_{tE} , se propune efectuarea în timpul încercării a unei mișcări de translație orbitală orizontală a electrodului, cu excentricitate $e = 0,1...0,3$ mm.

Valorile pentru A_{tE} pot fi mărite întrucâtva dacă unuia din electrozi i se imprimă o mișcare de translație orbitală orizontală, care activează evacuarea deșeurilor din interstițiu.

Spre deosebire de durabilitatea electroerozivă, uzura electrodului se determină în condițiile concrete și complexe ale

prelucrării dimensionale electroerozive, când în spațiul de lucru există toate tipurile de descărcări electrice (N_{pp} , N_{pm} , N_{fg}), ca o consecință directă a factorilor geometrici ai interstițiului: trasee lungi de evacuare, raze de curbură mici, grosimi δ mici ale interstițiului /115, 213, 214, 298/.

Această definiție a noțiunilor și clarificare a conținutului încercărilor, în conformitate cu procesele ce se desfășoară în spațiul de lucru, lipsește în literatura de specialitate cunoscută.

5.2. Procese fizico-chimice la uzarea electrodului de transfer în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.

O primă sinteză privind grupele de procese componente ale uzării electrodului ET (prelevare de substanță prin eroziune de la ET + depunere pelicule la ET) a fost prezentată în § 3.3.1 pentru cazul utilajelor actuale de prelucrare prin eroziune electrică cu copierea formei.

Datorită caracteristicilor descărcării electrice în impuls (temperatura în canalul descărcării este obișnuit 10.000... 11.000 °C la descărcarea în scînteie $t = 0...10^{-6}$ s, respectiv 4.000...5.000 °C la descărcarea în arc $t = 10^{-5}...10^{-4}$ s de la străpungerea lichidului de lucru LL) eroziunea ET este inevitabilă și se desfășoară în orice condiții din spațiul de lucru al SATO. Două decenii de cercetări au permis stabilirea unei scări a rezistenței la eroziune electrică a diverselor materiale pentru electrozi /213, 314, 340, 341, 394/.

Procesele de prelevare prin eroziune nu puteau însă explica uzurile foarte reduse ale ET ce apar în anumite condiții. Încă în 1961 /418/, pe baza unui număr mare de experimentări, s-a emis ipoteza că electrozii din cupru și grafit supuși eroziunii în anumite condiții de regim electric și lichid de lucru se autorefac prin depunerea la suprafața lor a unor pelicule de protecție din grafit, formate din produsele pirolizei lichidului de lucru D_{pir} (fig.3.5). Cercetările teoretice și experimentale desfășurate au confirmat în timp această ipoteză /17, 62, 108, 217, 252, 288, 332, 382, 393, 420/. În prezent este demonstrat faptul că depunerea peliculelor și protejarea electrodului împotriva uzării necesită /212, 217/ îndeplinirea următoarelor condiții în spațiul de lucru SLE, respectiv SL :

- 1) temperatura la suprafața electrodului ET (T_{ET}) să nu

fie sub o anumită temperatură critică de formare a peliculei ($T_{depE} \approx 700^{\circ}C$) și să nu depășească temperatura de topire a materialului ET (T_{topE}) :

$$T_{depE} \leq T_{ET} < T_{topE} \quad (5.5)$$

2) în apropierea zonei ET încălzită la temperatura T_{ET} să existe în cantitate suficientă produse lichide și gazoase ale pirolizei D_{pir} , din care să se formeze pelicula prin depunere pe ET :

$$D_{pir} \geq D_{plim} \quad (5.6)$$

3) procesele din spațiul de lucru să se desfășoare astfel încât în zona ET încălzită la temperatura T_{ET} depunerea peliculei să se facă timp suficient de mare, iar grosimea peliculei δ_{dep} să asigure protecția ET la regimul de prelucrare dat :

$$\delta_{dep} \approx \delta_{dopt} \quad (5.7)$$

Desigur că situația ideală, a uzurii nule la electrodul ET, o constituie procesul dinamic perfect echilibrat în spațiu și timp al depunerii și eroziunii peliculei de grafit inclusiv la suprafața ET. Aceasta este încă un obiectiv al viitorului și prognozele /328/ apreciază că automatizarea avansată a proceselor pentru toată gama regimurilor de prelucrare electrice cu uzură nulă, necesită cel puțin 15 ani de cercetări.

În situația actuală, SATO existente pentru prelucrare prin eroziune electrică cu copierea formei realizează pentru anumite regimuri uzuri nule, pentru alte regimuri uzuri ale ET mai puțin sau mai mult pronunțate (are loc eroziunea peliculei depuse și a materialului de bază al ET sau, când nu există condiții de depunere, numai eroziunea materialului de bază al ET). În anumite condiții /213, 217, 314, 409/ apare chiar o uzură „negativă” a ET - când local debitul depunerii la ET (Q_{dep}) depășește debitul prelevării de la ET (Q_E) - sau apare zgurificarea la obiectul prelucrării OP.

Pentru a reduce sau a anula uzura electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei s-au făcut cercetări numeroase pe diverse direcții :

- noi materiale sau noi structuri ale materialelor pentru electrozi /108, 176, 192, 208, 250, 314, 327, 378, 394/ ;
- noi lichide de lucru sau noi adaosuri la acestea, inclusiv de pulbere de grafit /73, 108, 235, 284, 327/;
- îmbunătățirea sau optimizarea caracteristicilor impulsurilor de tensiune și curent generate de generatoarele de impulsuri

ale utilajelor de prelucrare electroerozivă /62, 108, 177, 188, 205, 214, 288, 314, 332, 382, 391/;

- îmbunătățirea sau optimizarea caracteristicilor circulației forțate a lichidului de lucru /106, 115, 186, 274, 369/.

În producția de utilaje pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, în mod deosebit după 1965, s-a aplicat însă preponderent generarea impulsurilor cu coeficienți de umplere de valori mari ($\tau \rightarrow 1$) pentru operații de degroșare cu uzură redusă, respectiv se recomandă în cărțile mașinilor rapoarte mici între amplitudinile impulsurilor de curent și duratele impulsurilor, la operații de finisare cu uzură mijlocie /213, 214, 314, 358, 455, 456, 458/. Chiar dacă funcționează în conexiune cu regulatoare de avans de foarte bună calitate, cu asemenea tipuri de generatoare și în lipsa comenzilor adaptive avansate nu se pot elimina efectele de zgurificare sau uzură „negativă” (încărcare la electrod). Deabia după anul 1970, o dată cu inventarea și producerea în serie a generatoarelor de impulsuri de protecție (peliculizare) /214, 278, 314/ s-a depășit această dificultate, creindu-se premisele ca după 1980 să se extindă în industrie generatoarele de impulsuri universale cu uzuri reduse ($\gamma = 0,1..5\%$) și la regimurile de finisare (rugozități la obiectul prelucrării $R_a < 1\ \mu\text{m}$), la care să fie reglabile coeficientul de umplere, forma, amplitudinea și frecvența celor trei categorii de impulsuri: de străpungere, de lucru, de peliculizare /104, 192, 217/.

Concluzia ce se degajă din această analiză a proceselor este aceea că, deși s-au realizat pînă în prezent progrese remarcabile în reducerea uzurii electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, aceasta va rămîne încă mult timp un dezavantaj pentru procedeu. Dată fiind cunoașterea actuală insuficientă a procesului de uzare la nivel macroscopic /24, 63, 64, 163, 164, 166, 248, 263/ se impune cercetarea unor aspecte privind variabilele procesului la nivelul spațiului de lucru SL, interdependențele dintre variabile, respectiv dintre variabile și parametrii.

5.3. Procese la nivel macrogeometric în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.

5.3.1. Variabile geometrice și procese la nivel macroscopic.

Pentru procesul de uzare a electrodului ET, respectiv de

prelevare de la obiectul prelucrării OP variabilele macrogeometrice de intrare (independente de proces - fig.2.2) sînt:

a) la suprafața inițială a OP: formă, dimensiuni, poziție reciprocă a suprafețelor componente, abaterile dimensionale, de formă sau poziție față de prescripțiile documentației tehnice de execuție a OP.

b) la suprafața inițială a ET: formă, dimensiuni, poziție reciprocă a suprafețelor componente, abaterile dimensionale, de formă sau poziție față de prescripțiile documentației tehnice de execuție a ET.

Formele suprafețelor active inițiale ale OP și ET pot fi descrise (vezi § 3.1.2) prin ecuații algebrice, ecuații transcendente, prin coordonate. Prin calcule sau citire directă din documentația de execuție, se pot determina razele de curbură locale inițiale.

În general forma inițială a suprafeței active a electrodului diferă de cea inițială a suprafeței active a obiectului prelucrării, urmînd ca prin prelucrarea electroerozivă forma ET să se copieze cît mai exact la piesă, țînînd seama de grosimea interstițiului dintre ET și OP. Această diferență de formă între suprafețele active inițiale ale ET și OP determină ca în general procesul de generare a suprafeței la piesă să parcurgă local, succesiv, două categorii de faze:

a) faze tranzitorii, caracterizate din punct de vedere geometric de variația importantă a grosimii δ a interstițiului ET-OP, datorată unor diferențe între razele inițiale de curbură în puncte conjugate (pe aceeași normală) ale suprafețelor ET și OP, mai mare ca grosimea interstițiului :

$$|r_{KPi} - r_{KEi}| \gg \delta \quad (5.8)$$

b) faze staționare, caracterizate din punct de vedere geometric de relația:

$$r_{KPf} \approx r_{KEf} + \delta \quad (5.9)$$

în care: r_{Ki} /mm/ - raza de curbură inițială în zona considerată; r_{Kf} /mm/ - raza de curbură finală în zona considerată; δ /mm/ - grosimea interstițiului între ET-OP pentru regimul de lucru considerat; indicele P - referitor la obiectul prelucrării OP; indicele E - referitor la electrodul ET.

În prima aproximație a studiului teoretic al uzării electrodului, pentru explicitare, în figura 5.1 se prezintă urmele

unei secțiuni normale pe suprafețele sferice sau cilindrice ale ET și OP, în ipotezele: uzura relativă volumică a electrodului $\gamma_0 > 0$;

deșeurile solide D_{sol} rezultat în urma prelevării de substanță este evacuat instantaneu din interstițiu. În cazul unei faze tranzitorii a procesului de generare a suprafeței (de exemplu, la începutul prelucrării), formarea interstițiului de grosime $\delta = \text{const.}$ pe o distanță ΔX (fig.5.1 a) necesită un timp $\Delta t_{\Delta X}$ de desfășurare a procesului de generare a suprafeței. Prelevarea de substanță de la OP și uzura ET determină micșorarea razei de curbură inițiale a OP de la r_{KPi} la raza de curbură finală r_{KPi} ,

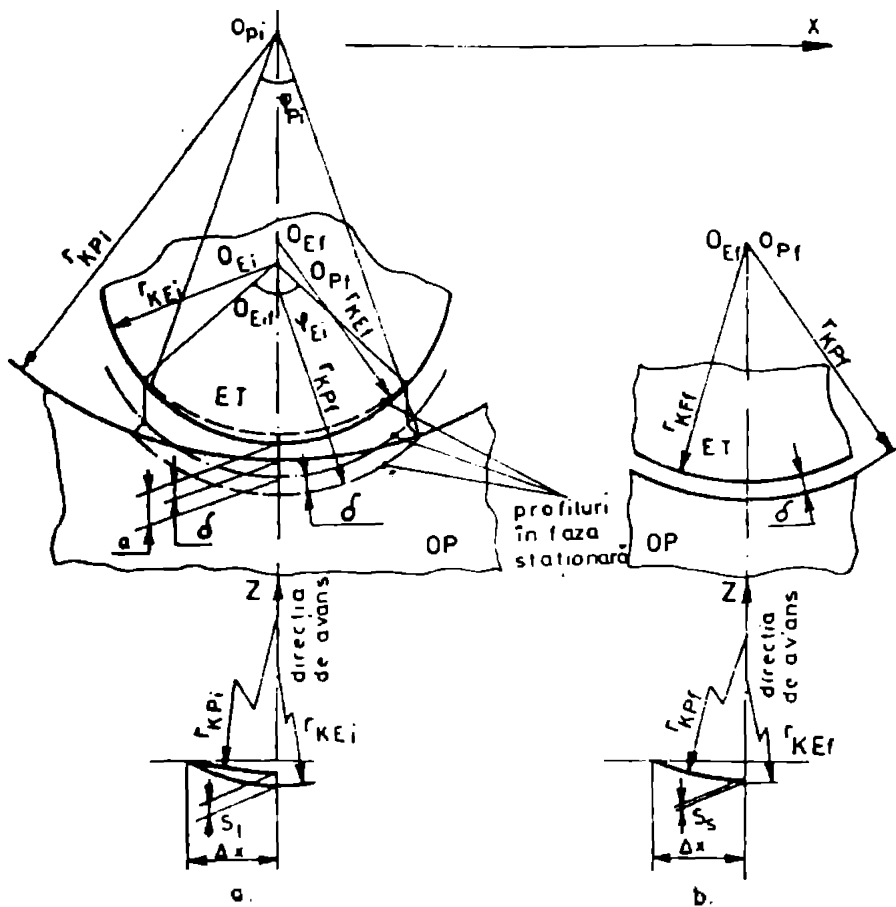


Fig.5.1. Interstițiul activ pentru faza tranzitorie (a) și staționară (b) a prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului.

respectiv creșterea razei de curbură inițiale a ET de la r_{KEi} la r_{KEf} . Există evident relațiile:

$$r_{KEi} < r_{KEf} < r_{KPi} \quad (5.10)$$

După timpul Δt_t de la începutul procesului de generare a suprafeței OP se ajunge în faza staționară (fig.5.1 b) caracterizată de relația (5.9).

Comparînd diferențele între razele de curbură ale OP și ET pentru cele două faze a și b ale generării suprafeței (fig.5.1) se constată că :

$$r_{KPi} - r_{KEi} \gg r_{KPi} - r_{KEf} \quad (5.11)$$

Din această cauză, prelucrarea dimensională a OP pe o aceeași porțiune ΔX necesită prelevarea de volume diferite de substanță de la OP în faza tranzitorie (V_{Pt}) și în faza staționară (V_{Pso}) :

$$V_{Pt} \gg V_{Pso} \quad (5.12)$$

Ordinul de mărime al diferenței între aceste două volume este

sugerat de diferența între înălțimea secerilor circulare pe direcția de avans OZ pentru cazul fazei tranzitorii (s_t - fig.5.1 a) respectiv fazei staționare (s_s - fig.5.1 b), la razele de curbură considerate.

Intrucît regimul de prelucrare este același în ambele faze se poate scrie, în ipoteza (5.1) :

$$\gamma = \frac{V_{Eto}}{V_{Pto}} = \frac{V_{Eso}}{V_{Pso}} \quad (5.13)$$

Tinînd seama de relația (5.12) și de faptul că porțiunea ΔX este considerată în figura 5.1 aceeași pentru ambele faze, rezultă imediat :

$$V_{Eto} \gg V_{Eso} \quad (5.14)$$

$$L_{EOZt} \gg L_{EOZs} \quad (5.15)$$

în care: L_{EOZt} /mm/ - uzura liniară longitudinală locală a electrodului pe axa OZ după faza tranzitorie; L_{EOZs} - idem, pentru faza staționară (fig.5.1).

Deci, în fazele tranzitorii ale generării suprafeței prin eroziune electrică cu copierea formei uzarea electrodului este mult mai intensă în zonele unde razele de curbură ale suprafeței sale active sînt mult mai mici decît razele de curbură în zonele conjugate ale suprafeței prelucrate la obiectul prelucrării.

In cazul fazelor staționare ale procesului de generare a suprafeței, caracterizate din punct de vedere geometric de relația (5.9), cercetări anterioare /6, 298/ ale autorilor Achimescu și Popa au permis stabilirea unor relații între variabile macrogeometrice de intrare și de ieșire, relații care elucidează mecanismul macroscopic de uzare a electrodului.

Aceste relații (vezi și §5.5.4) sînt :

$$\lambda_z = \frac{\Delta Z_E}{\Delta Z_P} = \lambda_l = \frac{h_{E1}}{h_{P1}} = \gamma_0 \left(1 \pm \frac{h_{P1} \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K1Ei}} \right) \left(1 \pm \frac{h_{P1} \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K2Ei}} \right) \quad (5.16)$$

$$h_{E1} = h_{P1} \gamma_0 \left(1 \pm \frac{h_{P1} \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K1Ei}} \right) \left(1 \pm \frac{h_{P1} \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K2Ei}} \right) \quad (5.17)$$

$$v_{E1} = v_{P1} \gamma_0 \left(1 \pm \frac{h_{P1} \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K1Ei}} \right) \left(1 \pm \frac{h_{P1} \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K2Ei}} \right) \quad (5.18)$$

în care: $\lambda_z = \lambda_l$ - uzura relativă liniară locală pe direcția de

avans OZ (longitudinală) a electrodului; $\Delta Z_E = h_{E1} / \text{mm/}$ - grosimea, pe direcția de avans, a stratului de material uzat la electrod în timpul Δt , la abscisa X; $\Delta Z_P = h_{P1} / \text{mm/}$ - grosimea, pe direcția de avans, a stratului de material prelevat de la obiectul prelucrării în timpul Δt , la abscisa $X + \delta \cdot \sin \varphi_i$, deoarece prelevarea de la OP se face pe direcția normalei înclinate cu unghiul inițial φ_i față de axa OZ; $\delta / \text{mm/}$ - grosimea interstițiului între ET-OP pentru regimul de lucru considerat; γ_0 - uzura relativă volumică în cazul electrozilor ET-OP avînd suprafețe active plane și în absența din interstițiu a descărcărilor de mărunțire și dispersare (relația 5.1); $r_{K1Ei} / \text{mm/}$ - raza de curbură inițială (înainte de începutul perioadei de timp Δt) a elementului de suprafață a ET, considerată în planul de avans, determinat de normala locală și direcția de avans OZ; $r_{K2Ei} / \text{mm/}$ - raza de curbură inițială a elementului de suprafață a ET, considerată în planul care conține normala și este perpendicular pe planul de avans; $v_{E1} / \text{mm/s/}$ - viteza liniară locală de uzare a electrodului ET, considerată longitudinal (pe o direcție paralelă cu direcția avansului); $v_{P1} / \text{mm/s/}$ - idem, pentru obiectul prelucrării OP.

Se observă că, în cazul fazelor staționare ale procesului de generare a suprafeței piesei, la suprafețe plane ale electrodului ET și obiectului prelucrării OP caracterizate de razele de curbură inițiale $r_{K1Ei} = r_{K2Ei} = r_{K1Pi} = r_{K2Pi} = \infty$ în condițiile (5.1) și în conformitate cu (5.17) și (5.18) rezultă :

$$h_{E1} = \gamma_0 \cdot h_{P1} \quad ; \quad v_{E1} = \gamma_0 \cdot v_{P1} \quad (5.19)$$

Dacă pentru zonele plane ale ET și OP se admite o anumită valoare h_{P1p} , pentru grosimea unui strat de substanță prelevată de la OP, la un regim electric de lucru dat acestea îi corespunde timpul de prelucrare Δt . Cu ipoteza (5.1) considerată, procesul de uzare a ET poate fi descris din punct de vedere geometric ca o succesiune continuă de secvențe j ($j = 1, 2, \dots, n$) de uzare, fiecare avînd durata :

$$t = f(h_{P1p}; \text{pereche ET-OP; regim de lucru}) / \text{min/} \quad (5.20)$$

Tot conform (5.17) și (5.18) rezultă că, pentru același ET, în fiecare secvență j uzura h_{E1m} la muchii exterioare orizontale ($r_{K1Ei} \approx 0$ și $r_{K2Ei} \gg 0$), verticale ($r_{K1Ei} \gg 0$ și $r_{K2Ei} \approx 0$) sau de poziție oarecare - este mai mare decît uzura h_{E1p} în zonele plane ale ET. Analog, rezultă că în fiecare secvență j , la raze de curbură comparabile cu cele de la muchii, uzura h_{E1c} la colțuri exterioare

($r_{K1Ei} \approx 0$; $r_{K2Ei} \approx 0$) este mai mare decît uzura h_{E1m} în zona muchiilor. Atunci sînt adevărate inegalitățile:

$$h_{E1o} > h_{E1m} > h_{E1p} \quad ; \quad v_{E1c} > v_{E1m} > v_{E1p} \quad (5.21)$$

Aceasta înseamnă că în zonele convexe ale ET, după desfășurarea unei secvențe j de uzare, la colțurile și muchiile exterioare razele de curbură finale r_{KEfj} vor crește față de cele inițiale r_{KEij} cu atît mai mult cu cît valoarea mărimilor γ_0 și δ este mai mare, respectiv cu cît valoarea mărimilor r_{KEij} și φ_{ij} este mai mică. Pentru secvența de uzare următoare ($j+1$) razele de curbură și unghiurile de înclinare inițiale ale porțiunii considerate vor fi:

$$r_{KEi(j+1)} = r_{KEfj} \quad (5.22)$$

$$\varphi_{i(j+1)} = \varphi_{fj} \quad (5.23)$$

Deci în faza staționară a procesului de generare a suprafeței piesei prin eroziune electrică cu copierea formei, procesul de uzare a electrodului ($\gamma_0 > 0$) se prezintă din punct de vedere geometric ca o succesiune de modificări (cu durata Δt) a zonelor suprafeței active cu $r_{KEi} \neq \infty$:

$$r_{KEi1} \rightarrow r_{KEf1} \rightarrow \dots \rightarrow r_{KEfj} \rightarrow \dots \rightarrow r_{KEfn} \quad (5.24)$$

$$\varphi_{ij} \rightarrow \varphi_{f1} \rightarrow \dots \rightarrow \varphi_{fj} \rightarrow \dots \rightarrow \varphi_{fn} \quad (5.25)$$

În zonele suprafeței active a ET unde $r_{KEi} = \infty$, în fiecare secvență de durată Δt se uzează un strat de material de grosime h_{E1p} , în cazul cînd condițiile menționate nu se modifică.

În realitate, evacuarea instantanee din interstițiu (ipoteza 5.1) a deșeurilor solid D_{sol} se întîlnește extrem de rar în practica prelucrării industriale prin eroziune electrică cu copierea formei. Prezența în interstițiu a deșeurilor solide și a aglomerărilor acestora A_{sol} în anumite zone, în mod special în cele cu valori mici ale razelor de curbură r_{KE} , r_{KP} și în zonele de trecere de la traseul orizontal la traseul vertical de evacuare, determină apariția reacției inverse interne prin intermediul descărcărilor de mărunțire și dispersare N_{pm} (vezi § 3.3.1), ceea ce accentuează suplimentar uzarea electrodului tocmai acolo unde factorii geometrici cauzează uzură preponderentă.

Se pot formula următoarele concluzii:

1). La prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, în condiții de prelucrare date, chiar dacă nu se iau în considerare efectele descărcărilor de mărunțire și dispersare a

deșeurului solid ce apare obișnuit în procesele de evacuare a acestora din interstițiu, uzura electrodului se distribuie neuniform datorită factorilor geometrici. Variabilele geometrice de intrare care determină direct uzura locală diferențiată a electrodului și implicit generarea suprafeței piesei, sînt: curburile locale ale suprafețelor active ale electrodului și obiectului prelucrării; unghiul dintre normala locală la suprafața activă a electrodului și direcția de avans a acestuia; grosimea interstițiului.

2). Viteza de uzare locală v_{E1} , uzura relativă liniară locală λ_l , uzura liniară locală a electrodului L_E sînt constante pe toată suprafața activă a ET numai în cazul suprafețelor active plane la ET și OP. (curburile $K_E = 1/r_{KE} = K_P = 1/r_{KP} = 0$), perpendiculare pe direcția de avans ($\varphi = 0$).

3). În cazul suprafețelor active de altă formă și orientare valorile mărimilor v_{E1} , λ_l , L_E se modifică în funcție de curbura locală a suprafeței și de unghiul dintre normala locală și direcția de avans :

- la curburi pozitive (suprafețe convexe ale ET), v_{E1} , λ_l , L_E cresc cu creșterea curburii locale a ET;

- la curburi negative (suprafețe concave ale ET), v_{E1} , λ_l , L_E scad cu creșterea valorilor absolute ale curburii locale a ET;

- la o anumită valoare a curburii creșterea, respectiv scăderea v_{E1} , λ_l , L_E este accentuată de micșorarea unghiului φ_i și de mărirea grosimii δ a interstițiului ET-OP.

4). La colțuri ($r_{K1Ei} \approx r_{K2Ei} \approx 0$) respectiv la muchii ($r_{K1Ei} \ll r_{K2Ei}$ sau $r_{K2Ei} \ll r_{K1Ei}$) ale electrodului, modificarea în timp a razelor de curbura inițiale începe întotdeauna din punctele de pe suprafața ET situate pe normale paralele la direcția de avans cînd $\varphi_i = 0$ (deci h_{Elmax}) și se propagă diferit:

- la curburi pozitive (suprafețe convexe ale ET) are loc o creștere a razei de curbura ($r_{KEf} > r_{KEi}$), prin propagarea uzării maxime h_{Elmax} înspre zonele suprafeței ET ce au raze de curbura mai mari decît ale muchiilor sau colțurilor;

- la curburi negative (suprafețe concave ale ET) are loc o micșorare a razei de curbura ($r_{KEf} < r_{KEi}$), prin propagarea uzării maxime h_{Elmax} în spre colțuri sau muchii.

5). Cînd unghiul $\varphi_i \rightarrow 90^\circ$ și $r_{K1E} \rightarrow \infty$, valorile mărimilor v_{E1} și λ_l devin nedeterminate, avînd loc trecerea de la suprafețele active la suprafețele pasive ale interstițiului.

6). În cazul evacuării dificile a deșeurilor solide din

interstițiu (grosimi mici ale interstițiului, trasee lungi de evacuare, modificări ale traiectoriei traseului de evacuare etc.) uzura electrodului este accentuată suplimentar tocmai acolo unde factorii geometrice cauzează uzură preponderentă.

5.3.2. Interdependențe între variabile la uzura electrodului.

Studiul efectuat la § 5.3.1 a demonstrat importanța primordială a variabilelor geometrice în determinarea uzării electrodului ET la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

Analiza detaliată a procesului de uzare /298/ cu considerarea dependențelor logice între un număr mare de variabile, studiate în literatura de specialitate, a permis stabilirea interdependențelor între grupele de variabile de ieșire și grupele de variabile de intrare (fig.5.2).

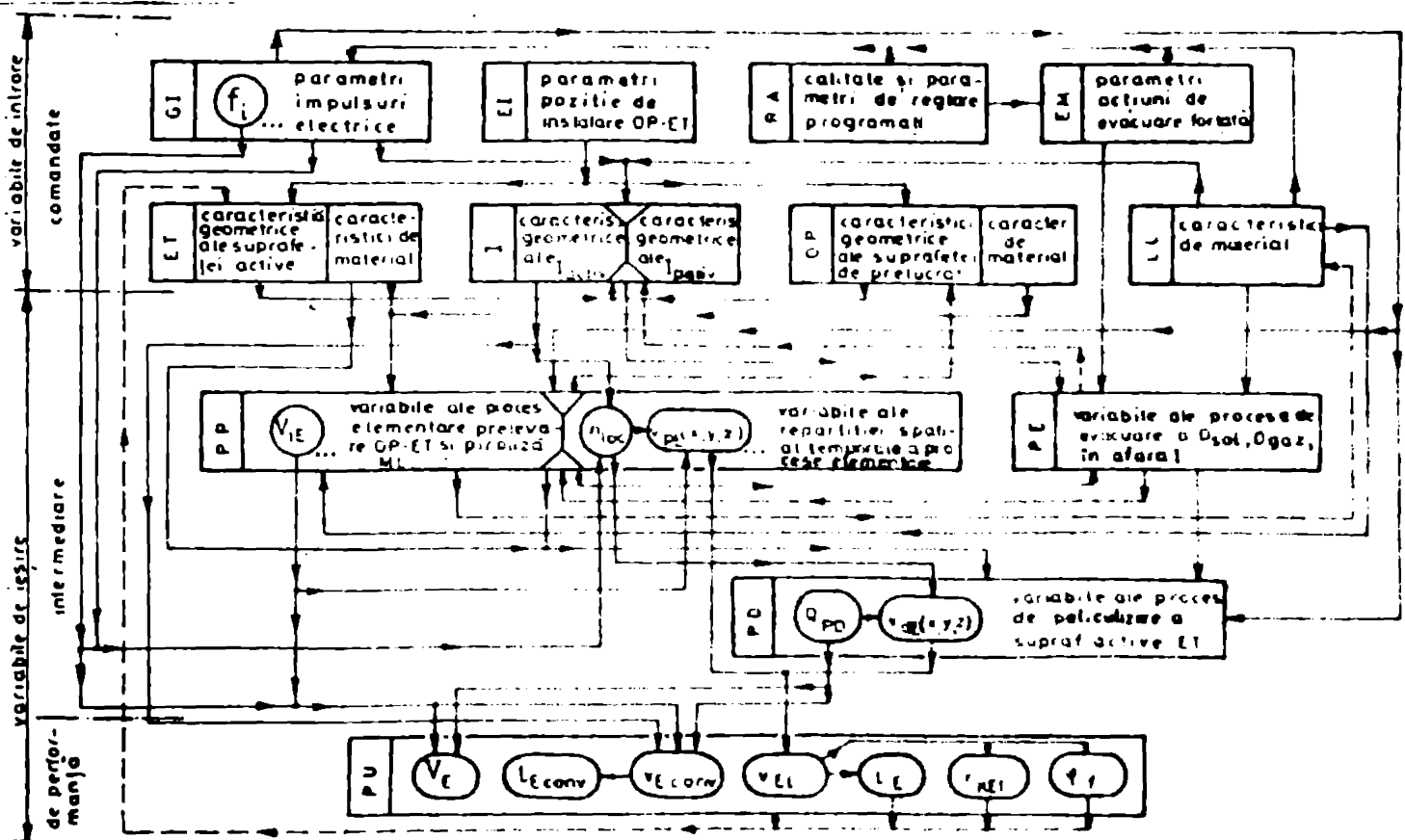


Fig.5.2. Schema interdependenței principalelor categorii de variabile care determină uzura electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

În cadrul unor grupe s-au evidențiat variabilele care determină direct mărimile ce caracterizează procesul de uzare a ET, fără a se prezenta, - din motive de spațiu, - și alte interdependențe în interiorul unei grupe.

Grupele de variabile sînt dispuse pe nivele, corespunzătoare în principal ordinii lor de intrare în acțiune, în cadrul

duratei Δt . Mărimile de intrare provenite de la utilajul tehnologic, - respectiv de la generatorul de impulsuri GI, echipamentul de instalare EI, regulatorul de avans RA, echipamentul mecanic și hidraulic ce produce evacuarea EM, - cît și de la elementele interstițiului de lucru OP, ET, LL, I, determină desfășurarea în interstițiu a proceselor de prelevare și piroliză PP, de evacuare PE și de depunere PD (peliculizare) pe suprafața activă a ET. Unele variabile intermediare, rezultate din procesele PP, PE, PD, împreună cu unele variabile de intrare determină direct mărimile caracteristice ale procesului de uzare PU, definite la § 5.3.1: r_{KEf} , φ_f , L_E , v_{E1} .

Rezultă că majoritatea variabilelor procesului de prelucrare determină indirect uzura electrodului, prin intermediul proceselor componente, în urma unor interdependențe multiple, în trepte. Schema din figura 5.2 prezintă interdependențele directe (linie continuă) și categoriile principale de reacții inverse interne (linie întreruptă).

Un factor de cea mai mare importanță pentru procesul de uzare a electrodului este densitatea convențională medie locală n_{loc} a descărcărilor în timpul Δt , definită /298/ ca :

$$n_{loc} = \frac{N_{XY}}{\Delta X \cdot \Delta Y} \quad /mm^{-2}/ \quad (5.26)$$

unde: N_{XY} - numărul de descărcări pe porțiunea din suprafața activă a ET, a cărei proiecție în planul $Z = 0$ este elementul de suprafață $\Delta X \cdot \Delta Y$.

Mărimea n_{loc} determină direct valoarea vitezei liniare locale v_{pE} de prelevare din ET și a vitezei liniare locale v_{dE} de depunere pe suprafața ET, ambele fiind considerate pe direcția de avans. Din diferența acestor două viteze rezultă viteza liniară locală de uzare a electrodului :

$$v_E = v_{pE} - v_{dE} \quad (5.27)$$

Pe direcția de avans, aceasta poate fi definită și ca:

$$v_{E1} = \frac{L_E}{\Delta t} \quad /mm/min./ \quad (5.28)$$

în care: L_E /mm/ - uzura liniară locală a ET, măsurată paralel cu direcția de avans; Δt /min./ - durata secvenței de timp.

Intensitatea procesului de uzare a ET este caracterizată global de viteza liniară convențională de uzare a electrodului :

$$v_{E.conv.} = \frac{Q_E}{A_{tE}} = \frac{Q_{EP} - Q_{ED}}{A_{tE}} \quad / \frac{\text{mm}}{\text{min}} / \quad (5.29)$$

în care: Q_E /mm³/min/ - debitul uzării electrodului; Q_{EP} /mm³/min/- debitul de material prelevat de electrod; Q_{ED} /mm³/min/ - debitul de material depus (peliculizat) la electrod; A_{tE} /mm²/ - protecția suprafeței active a ET pe planul $Z = 0$.

Rezultatul procesului de uzare PU este uzura ET, caracterizată global de volumul V_E de material uzat de la electrod sau de uzura liniară convențională a acestuia:

$$L_{E.conv.} = \frac{V_E}{A_{tE}} \quad / \text{mm} / \quad (5.30)$$

respectiv caracterizată local de uzura liniară locală L_E , de curbura locală $K_f = 1/r_{KEf}$ a suprafeței active a ET, de unghiul φ_f al normalei locale la suprafața activă a ET față de direcția de avans, de grosimea δ a interstițiului.

Din relațiile (5.16), (5.17), (5.18), din figurile 3.5 și 5.2 rezultă de asemeni că tot geometria în continuă schimbare a interstițiului este cauza care la un moment dat perturbă stabilitatea procesului de prelucrare prin formarea în interstițiu a aglomerărilor de deșuri solide A_{sol} , accentuînd suplimentar uzura ET.

5.4. Variabile pentru caracterizarea uzării, uzurii și durabilității electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

Mărimile ce caracterizează uzura electrodului sînt mărimi geometrice ce pot fi măsurate direct pe electrod, după încetarea procesului de prelucrare. Ele constituie una din categoriile de mărimi (variabile) de performanță ale procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică.

Procesul de uzare mai poate fi caracterizat de alte variabile de performanță dau intermediare, măsurabile direct sau indirect, conținînd însă obligatoriu factorul timp în relația de dependență.

Mărimile pot caracteriza uzura și uzura electrodului, global sau local, respectiv în fiecare din aceste cazuri ele pot fi absolute, relative sau convenționale. Tabelul 5.3 prezintă sinteza acestora, pe baza literaturii clasice /213, 314, 405/ și a cercetărilor efectuate la subcapitolul 5.3. S-au inclus în tabel și

unele mărimi propuse de Polanski /294/, Schumacher /355/, Siwczik /364/, Nanu și Buzulică /256/, Popa și Achimescu /6, 298/.

Tabelul 5.3.

Principalele mărimi pentru caracterizarea macroscopică a procesului de uzare și a uzurii electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

Categorii de mărimi		Mărimi caracteristice pentru :	
		proces uzare	uzură
G l o b a l e	absolute	$Q_E = \frac{V_E}{t} \quad / \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} / \quad (5.31)$	$V_E \quad / \text{mm}^3 /$
		$q_{EI} = \frac{Q_E}{I_{\text{med}}} \quad / \frac{\text{mm}^3}{\text{A} \cdot \text{min}} / \quad (5.32)$	
	relative ET/OP	$\delta = \frac{Q_E}{Q_P} \quad \text{/}\% / \quad (5.33)$	$\delta = \frac{V_E}{V_P} \quad \text{/}\% / \quad (5.34)$
	$\psi = \frac{Q_P}{Q_E} = \frac{1}{\delta} \quad \text{/}\% / \quad (5.35)$	$\psi = \frac{V_P}{V_E} \quad \text{/}\% / \quad (5.36)$	
c o n v e n ț i o n a l e		$v_{E\text{conv}} = \frac{Q_E}{A_{tE}} \quad / \frac{\text{mm}}{\text{min}} / \quad (5.37)$	$L_{E\text{conv}} = \frac{V_E}{A_{tE}} \quad / \text{mm} / \quad (5.38)$
		$k_{ev} = \frac{\delta - \delta_0}{\delta} \quad \text{/}\% / \quad (5.39)$	$u_l = \frac{L_{E\text{min}}}{L_{E\text{conv}}} \quad \text{/}\% / \quad (5.40)$
l o c a l e	absolute	$v_{E\text{med}} \quad / \frac{\text{mm}}{\text{min}} /$ $v_{E1} \quad / \frac{\text{mm}}{\text{s}} /$ $q_{Ej} = \frac{v_{L\text{med}}}{j} \quad / \frac{\text{mm}^3}{\text{A} \cdot \text{min}} / \quad (5.41)$	$L_E \quad / \text{mm} / ; L_{Et} \quad / \text{mm} / ;$ $r_{KEf} \quad / \text{mm} / ; \varphi_{Ef} \quad / \text{rad} / ;$ L_{Eadm}
	relative ET/OP	$\lambda_l = \frac{v_{E\text{med}}}{v_{P\text{med}}} \quad \text{/}\% / \quad (5.42)$	$\lambda_L = \frac{L_E}{L_P} \quad \text{/}\% / \quad (5.43)$ $\mu_l = \frac{L_E - L_{E\text{min}}}{L_{P\text{max}}} \quad \text{/}\% / \quad (5.44)$
	convenționale	$n_{loc} = \frac{N_{XY}}{\Delta X \cdot \Delta Y} \quad / \text{mm}^{-2} \cdot \text{min}^{-2} / \quad (5.45)$ $\varepsilon_{l1} = \frac{(H_P - L_P)_i \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K1Ei}} \quad (5.46)$ $\varepsilon_{l2} = \frac{(H_P - L_P)_i \cos \varphi_{i+\delta}}{r_{K2Ei}} \quad (5.48)$	$a_p = \frac{A_P}{L_P} \quad (5.47)$

Mărimile K_{ev} , n_{loc} , q_{Ej} , L_{tE} , ϵ_{l1} și ϵ_{l2} sînt originale și permit o mai bună cunoaștere a procesului sau a tendințelor acestuia (ϵ_{l1} și ϵ_{l2}).

Semnificația simbolurilor este următoarea (vezi și figura 5.3):

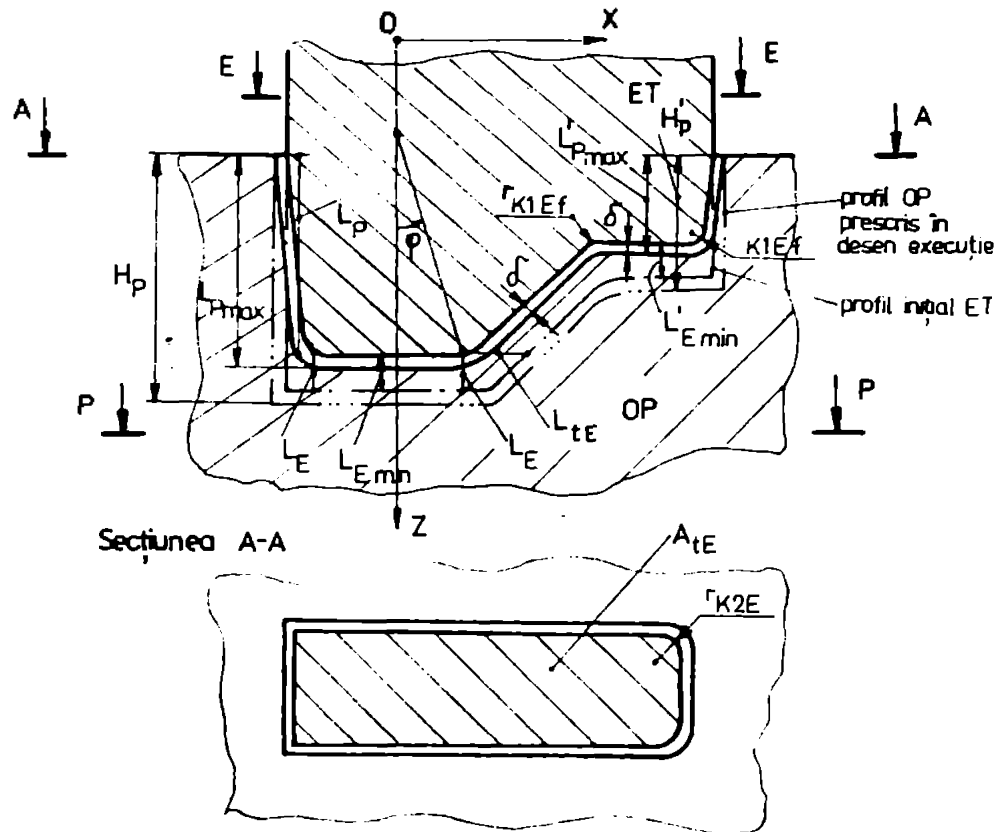


Fig.5.3. Mărimi geometrice ce caracterizează uzura electrodului la un moment t al prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei:
 EE - secțiune normală prin partea pasivă a electrodului, căreia îi corespunde aria A_{nE} ; PP - secțiune normală prin partea neprelucrată a obiectului prelucrării, căreia îi corespunde aria A_{nP} .

- Q_E / $\frac{mm^3}{min}$ / - debitul uzării electrodului;
- V_E / mm^3 / - volumul uzării electrodului după timpul de prelucrare t ;
- q_{EI} / $\frac{mm^3}{A \cdot min}$ / - debitul specific al uzării electrodului;
- I_{med} / A / - curentul mediu prin interstițiu;
- δ / % / - uzura relativă volumică a electrodului;
- ψ / % / - productivitatea relativă volumică a prelucrării;
- Q_P / $\frac{mm^3}{min}$ / - debitul prelevării de la obiectul prelucrării;
- V_P / mm^3 / - volumul prelevării de la obiectul prelucrării;
- v_{Econv} / $\frac{mm}{min}$ / - viteza liniară convențională de uzare a electrodului;
- $A_{tE}(z)$ / mm^2 / - aria proiecției suprafeței active a electrodului pe un plan transversal $Z = 0$ ($A_{tE} \leq A_{nE}$);

- L_{Econv} /mm/ - uzura liniară convențională a electrodului;
- u_l /%/ - raportul de uzură longitudinală a electrodului, care indică gradul de uniformitate a uzurii;
- L_{Emin} /mm/ - uzura liniară longitudinală minimă a electrodului, măsurată paralel cu direcția de avans OZ;
- k_{ev} /%/ - ponderea uzării electrodului datorită descărcărilor prin deșeu (N_{pm} , N_{fg});
- $\gamma_o = \frac{1}{\Psi_o} = \frac{V_{Eo}}{V_{Po}}$ /%/ - durabilitatea la eroziune electrică (uzura relativă volumică) a electrodului determinată în condițiile precizate de tabelul 5.2, când se asigură $N_{pm} = N_{fg} = 0$;
- L_E /mm/ - uzura liniară longitudinală locală a electrodului, măsurată paralel cu direcția de avans OZ;
- L_{tE} /mm/ - uzura liniară transversală locală a electrodului, măsurată perpendicular pe direcția de avans OZ;
- L_{Eadm} /mm/ - uzura liniară longitudinală locală admisibilă a electrodului, în conformitate cu toleranțele prescrise de desenul de execuție al piesei;
- δ /mm/ - grosimea interstițiului geometric; dintre electrod și obiectul prelucrării, măsurată pe normala la suprafața prelucrată a OP și egală cu distanța dintre liniile adiacente (tangente la profilul microscopic real) ale ET și OP; în figura 5.3 δ este considerat constant, în ipoteza $N_{pm} = N_{fg} = 0$, contrară situației reale a procesului;
- δ_t /mm/ - grosimea interstițiului geometric frontal între electrod și obiectul prelucrării, adică a interstițiului dispus transversal /perpendicular) sau înclinat pe direcția avansului;
- δ_l /mm/ - grosimea interstițiului geometric lateral între electrod și obiectul prelucrării, adică a interstițiului dispus longitudinal (paralel) față de direcția avansului
- r_{KEf} /mm/ - raza de curbură locală finală (după o secvență de timp Δt sau după un timp t) a electrodului, indicele 1 precizează această rază în planul de avans, determinat de normala la suprafață în punctul respectiv și direcția de avans; indicele 2 precizează această rază în planul care conține normala și este perpendicular pe planul de avans
- φ_{Ef} /rad/ - unghiul dintre normala locală la suprafața electrodului (după o secvență de timp Δt sau după un timp t) și direcția de avans OZ;

- $v_{Elmed} / \frac{mm}{min} /$ - viteza liniară medie locală de uzare a electrodului, considerată pe o direcție paralelă cu direcția avansului;
- $v_{El} / \frac{mm}{s} /$ - viteza liniară locală de uzare a electrodului, considerată pe o direcție paralelă cu direcția avansului;
- $q_{Ej} / \frac{mm^3}{A \cdot min} /$ - factor de uzare locală a electrodului;
- $j / \frac{A}{mm^2} /$ - densitatea de curent prin suprafața electrodului;
- $v_{Pmed} / \frac{mm}{min} /$ - viteza liniară medie locală de prelevare de la obiectul prelucrării, considerată pe o direcție paralelă cu direcția avansului;
- $L_p / mm /$ - prelevarea liniară longitudinală locală de la obiectul prelucrării, măsurată paralel cu direcția de avans OZ;
- $\lambda_L / \% /$ - uzura relativă liniară locală longitudinală la electrod, considerată pe o direcție paralelă cu direcția avansului OZ;
- $\mu_l / \% /$ - raportul de uzură relativă liniară locală longitudinală la colțurile sau muchiile electrodului, considerat pe o direcție paralelă cu direcția avansului OZ;
- $n_{loc} / mm^{-2} /$ - densitatea convențională medie locală a descărcărilor în timpul Δt ;
- N_{XY} - numărul de descărcări pe porțiunea din suprafața activă a electrodului, a cărei proiecție în planul $Z = 0$ este elementul de suprafață $\Delta X \cdot \Delta Y$;
- ε_l - factor de neuniformitate locală a uzurii electrodului, considerată pe o direcție paralelă cu direcția avansului OZ, la un moment t ;
- $H_p / mm /$ - adâncimea locală de prelevare la obiectul prelucrării, conform desenului de execuție, măsurată paralel cu direcția de avans;
- $r_{KEl} / mm /$ - raza de curbură locală inițială (la începutul unei secvențe de timp Δt sau al unei perioade de timp t) a electrodului; indicele 1 precizează această rază în planul de avans, determinat de normala locală la suprafață în punctul respectiv și direcția de avans; indicele 2 precizează această rază în planul care conține normala și este perpendicular pe planul avansului;
- $\varphi_1 / rad /$ - unghiul inițial dintre normala locală la suprafața electrodului și obiectul prelucrării (la începutul unei secvențe de timp Δt sau al unei perioade de timp t) și direcția de avans OZ;

a_p /%/ - abaterea relativă longitudinală locală a dimensiunii obiectului prelucrării;

A_p /mm/ - abaterea absolută longitudinală locală a dimensiunii obiectului prelucrării, admisă conform câmpului de toleranță prescris în desenul de execuție.

Este evident că în mod analog se pot defini pe direcția normalei la suprafața activă a OP și ET mărimile corespunzătoare L_{En} , L_{Pn} , v_{Enmed} , v_{En} , λ_n , ϵ_{n1} , ϵ_{n2} .

La fel ca la prelucrarea dimensională prin contact între obiectul de transfer și obiectul prelucrării (așchiere, tăiere cu tăișuri asociate, prelucrare prin deformare plastică) și la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică se pot defini două categorii de durabilități ale obiectului de transfer :

1) durabilitatea efectivă a electrodului, ca interval de timp T_{ef} , de participare efectivă a acestuia la procesele de transformare ale prelucrării, între două schimbări succesive ale electrodului, impuse de mărimea uzurii admisibile L_{Eadm} , în conformitate cu toleranțele prescrise de desenul de execuție al piesei sau de procesul tehnologic proiectat;

2) durabilitatea optimă a electrodului T_{opt} , ca durabilitate efectivă optimă în raport cu anumite criterii: productivitate Q_p maximă; cost minim al operației etc.

5.5. Model matematic pentru procesul de uzare a electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică.

5.5.1. Etape în studiul proceselor la generarea suprafeței prin eroziune electrică cu copierea formei.

Datorită uzării inevitabile a electrodului de transfer ET și complexității proceselor fizico-chimice în spațiul de lucru, generarea suprafeței prin copiere la obiectul prelucrării OP (în final la piesa P) continuă să rămână un proces macroscopic insuficient cunoscut [24, 64, 263]. Acest fapt limitează performanțele prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei și impune aprofundarea cercetărilor în domeniu.

Din punct de vedere macroscopic procesul de generare a suprafeței prin copierea formei ET realizat în regim staționar (vezi subcapitolele 5.2 și 5.3) are o structură ierarhizată (fig.5.4) :

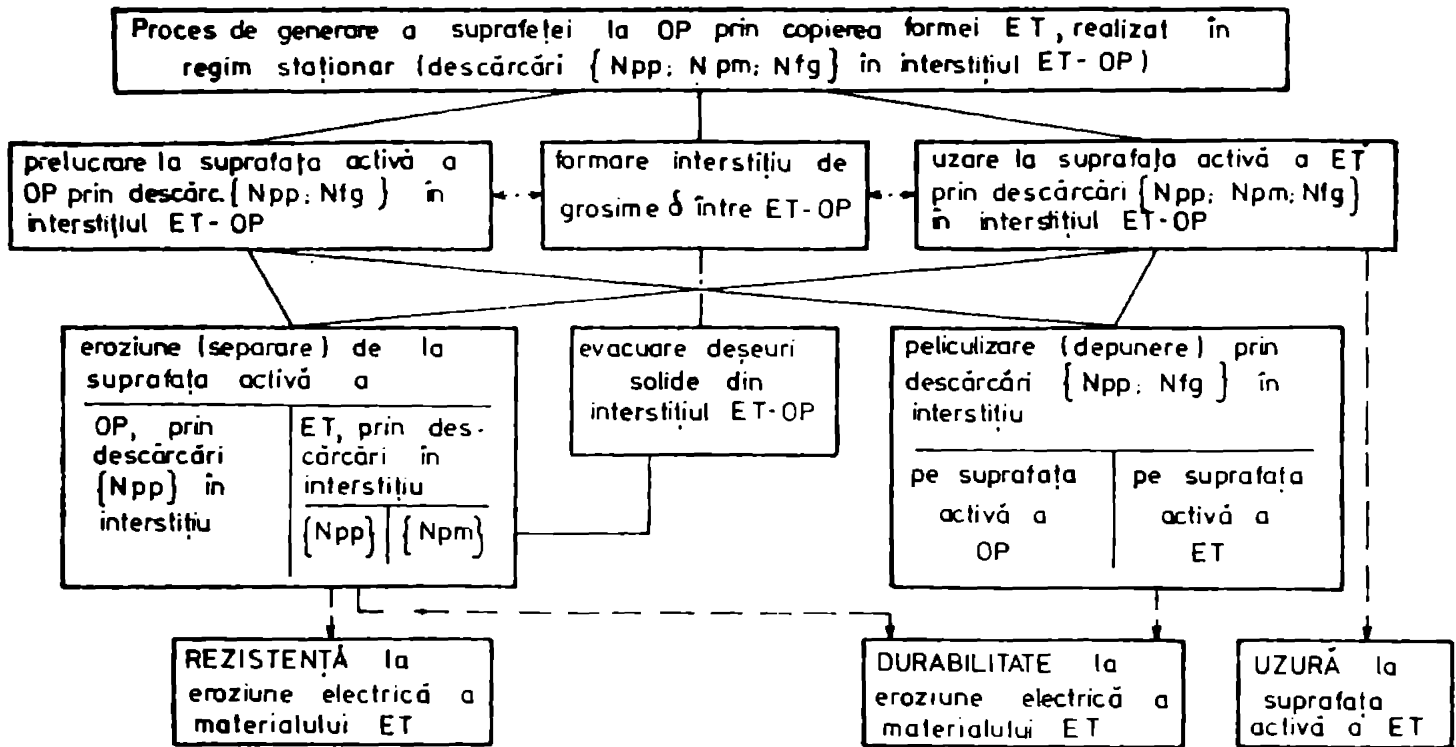


Fig.5.4. Structura procesului de generare a suprafeței la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului de transfer ET.

I. procese componente: a) proces de formare a interstițiului de grosime δ între ET-OP; b) proces de prelucrare la suprafața activă a OP; c) proces de uzare la suprafața activă a ET;

II. procese determinante: a) proces de prelevare (separare) de la suprafețele active ale OP și ET; b) proces de peliculizare (depunere) pe suprafețele active ale OP și ET; c) proces de evacuare din interstițiu a deșeurilor solide și gazoase.

Trebuie subliniat faptul că în condiții ideale, dacă nu ar exista procesul de uzare a ET, generarea suprafeței la OP s-ar reduce la formarea interstițiului și reproducerea prin copiere a formei ET, în urma proceselor de prelucrare.

Așa cum se cunoaște, în realitate prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei realizată pe utilajele actuale se desfășoară cu o uzură mai mare sau mai mică a ET, - consecință a tuturor categoriilor de procese din spațiul de lucru (fig.3.5; 5.2; 5.4). Dacă se elimină influența proceselor de evacuare (tabelul 5.1), materialul ET poate fi caracterizat de durabilitatea sa la eroziune electrică, iar dacă prin condițiile și regimurile de lucru se elimină și procesele de peliculizare (depunere), materialul ET poate fi caracterizat de rezistența sa la eroziune electrică.

Corespunzător proceselor componente, generarea suprafeței la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei

trebuie deci studiată în următoarele etape :

- 1) stabilirea legilor uzării ET în condițiile eliminării influenței evacuării deșeurilor (în ipoteza evacuării instantanee, în afara interstițiului, a materialului prelevat de la OP și ET);
- 2) stabilirea legilor formării interstițiului între ET-OP, în condițiile evacuării artificiale (forțate) a deșeurilor din interstițiu;
- 3) stabilirea legilor generării suprafeței OP în condițiile evacuării artificiale a deșeurilor din interstițiu.

Aceasta se conturează ca singura cale eficientă de studiu a procesului macroscopic, deosebit de complex, de generare a suprafeței prin eroziune electrică cu copierea formei.

Pe lângă dificultățile de studiu determinate de ierarhia proceselor, de mulțimea de procese fizico-chimice microscopice și de acțiunea intercorelată a unui număr foarte mare de factori /6, 115, 186, 317, 298, 366, 369, 388, 394, 395/, apare în plus dificultatea lipsei de generalitate a teoriei „restrînse” a generării suprafeței, valabilă numai pentru prelucrarea prin așchiere /46, 101/.

5.5.2. Utilizarea unor concepte ale termodinamicii proceselor ireversibile în teoria generală a generării suprafeței la prelucrarea dimensională.

Teoria generării suprafeței pentru prelucrarea prin așchiere s-a dezvoltat în mod deosebit în ultimele trei decenii /46, 101/ și a permis rezolvarea pe baze riguroase științifice a îmbunătățirii preciziei de prelucrare și rugozității, a creșterii productivității prelucrării, prin inventarea sau perfecționarea unor procedee și mașini unelte. Așchiera fiind o metodă tipică de prelucrare cu contact, scula așchietoare (unica componentă a corpului de transfer, cu funcție de obiect de transfer) este în contact direct cu obiectul prelucrării în timpul procesului de așchiere.

Această structură simplă a corpului de transfer CT la prelucrarea prin așchiere (§ 3.2.3) constituie principalul impediment al aplicării teoriei „restrînse” a generării suprafeței la prelucrarea prin eroziune electrică, caracterizată (§ 3.2.4) de structura bicomponentă a CT: obiect de transfer OT și agent fizico-chimic AFC de tip punte sau de tip jet, aflat simultan în contact direct cu OP și OT.

Din punct de vedere fizico-chimic, generarea suprafeței la prelucrarea dimensională este totodată un proces ireversibil,

indiferent de structura corpului de transfer. Acest fapt permite dezvoltarea unei teorii „generalizate” a generării suprafeței, pe baza unor concepte ale termodinamicii proceselor ireversibile.

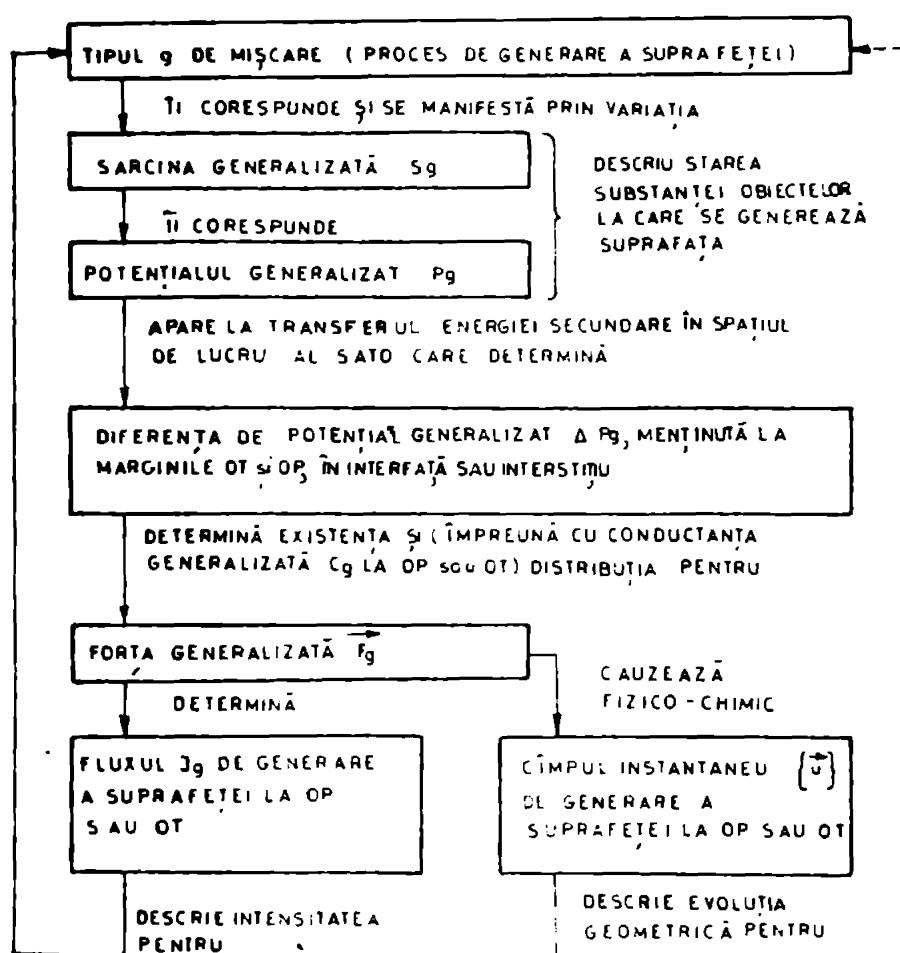


Fig.5.5. Determinismul energetic și informațional la generarea suprafeței în cazul prelucrării dimensionale

Teoria generării suprafeței la prelucrarea dimensională /306,397/ pornește de la concepția că /138/ orice formă de mișcare a materiei se manifestă prin modificarea unei „sarcini generalizate” de un tip bine determinat, iar acestea îi corespunde un „potențial generalizat” (fig.5.5). Sarcina generalizată și potențialul generalizat descriu starea substanței în mișcare, iar produsul lor trebuie să aibă dimensiune de energie.

În cazul generării suprafeței la prelucrarea dimensională sarcina generalizată S_g și potențialul generalizat P_g descriu starea substanței obiectelor la care se generează suprafața, adică starea substanței obiectului prelucrării OP (S_{gp}, P_{gp}) și a obiectului de transfer OT respectiv materialului de adaos MA ($S_{go}, P_{go}; S_{gm}, P_{gm}$) în timpul prelucrării. În anumite condiții (vezi § 3.2.3) realizate prin transfer de energie E_2 spre spațiul de lucru SL, între OT (MA) și OP există o diferență de potențial generalizat menținută la marginile OT (MA) și OP, în interfața (la prelucrări cu contact) sau în interstițiul (la prelucrări fără contact) dintre acestea. Diferența de potențial determină desfășurarea unor acțiuni asupra OP și OT (MA), care schimbă starea substanței acestora, iar unele acțiuni modifică și configurația OP sau OT (MA), adică generează suprafețe noi la OP sau OT (MA).

Diferența dintre potențialul generalizat P_{go} la marginile OT (respectiv dintre potențialul generalizat P_{gm} la marginile MA)

și potențialul generalizat P_{gP} la marginile OP :

$$\Delta P_{g1} = P_{gO} - P_{gP} ; \quad \Delta P_{g2} = P_{gM} - P_{gP} \quad (5.49)$$

determină existența și distribuția într-un mod oarecare a forțelor generalizate F_g . Prin definiție /138/, forța generalizată este:

$$\vec{F}_g = - \text{grad } P_g \quad (5.50)$$

În cazul generării suprafeței, în ultimă instanță, tocmai forțele generalizate \vec{F}_g reprezintă cauza fizico-chimică a apariției cîmpului instantaneu \vec{u} de generare a suprafeței, adică cîmpul vitezelor \vec{u}_P de deplasare a punctelor marginale ale OP, respectiv a cîmpului vitezelor \vec{u}_O de deplasare a punctelor marginale ale OT sau a cîmpului vitezelor \vec{u}_M de deplasare a punctelor marginale ale MA.

În tabelul 5.4 /397/ se prezintă caracteristicile categoriilor fenomenologice de metode simple (necombinate) de generare a suprafeței la prelucrarea dimensională. La metodele simple de generare a suprafeței în decursul întregului proces acționează forța generalizată de un singur tip: presiune ($g = 0$; $g = 1$); gradient al entalpiei, adică flux termic ($g = 2$; $g = 3$); intensitate a cîmpului electric ($g = 4$); gradient al potențialului chimic ($g = 5$); forță mecanică volumică ($g = 6$).

În aceste condiții, cîmpul instantaneu \vec{u} se poate considera ca un flux J_g de generare a suprafeței, adică un flux de transfer al volumului substanței în unitatea de timp prin suprafața corespunzătoare a OP, respectiv a OT sau a MA. Trebuie remarcat faptul că dimensiunea mărimii J_g este aceeași cu a mărimii u , adică $[m^3/m^2 \cdot s] = [m/s]$. Conform termodinamicii proceselor ireversibile /138/ este valabil:

$$|\vec{u}| = J_g = C_g |\vec{F}_g| \quad (5.51)$$

în care: \vec{F}_g - forța staționară de tipul g a generării suprafeței;
 C_g - coeficient de proporționalitate, numit conductanță generalizată a generării suprafeței.

Conductanța C_g a generării suprafeței caracterizează susceptibilitatea (sensibilitatea) OP, OT, MA respectiv a materialelor acestora la acțiunea forței generalizate de tip g și depinde de însăși natura și mărimea forței generalizate \vec{F}_g .

Aspectele energetice ale generării suprafeței sînt indisolubil legate de cele informaționale (fig.5.5). Dacă forțele generalizate \vec{F}_g reprezintă cauza fizico-chimică (energetică) a proceselor în spațiul de lucru și implicit cauza apariției cîmpului

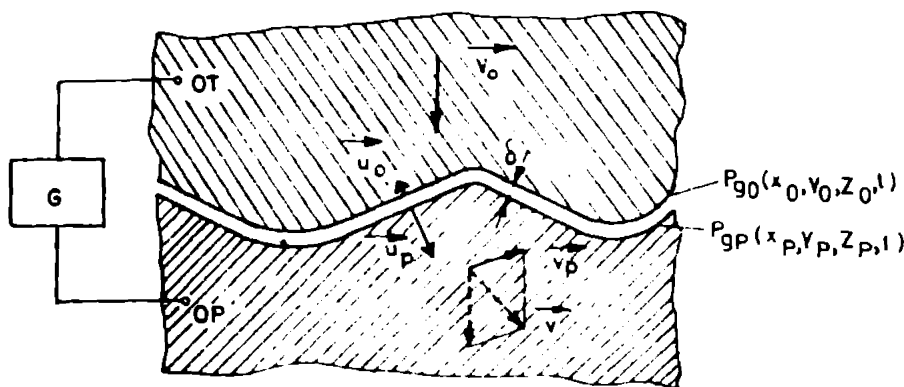
Categoriile de metode fenomenologice simple de generare a suprafețelor la prelucrarea dimensională

caracteristicile metodelor					
Numărul g și denumirea categoriei metodei	Dimensiunea sarcinii S _g	Dimensiunea potențialului P _g	Dimensiunea forței F _g și a conductanței C _g	Exemple de procedee de prelucrare dimensională	
g=0, mecanică	[S ₀] = m ² aria suprafeței	[P ₀] = J/m ² energie de suprafață	[F ₀] = N/m ² presiune [C ₀] = m ² /N.s		așchiere, forjare, ștanțare-matrișare
g=1, mecanică	[S ₁] = m ² aria suprafeței	[P ₁] = J/m ² energie de suprafață	[F ₁] = N/m ² presiune [C ₁] = m ² /N.s		separare prin rupere a corpului fragil
g=2, termică	[S ₂] = kg masa topiturii	[P ₂] = J/kg entalpia specifică	[F ₂] = J/kg.m gradient al entalpiei [C ₂] = s		turnare, prelucrare prin impulsuri electrice, tăiere cu arc electric, sudare cu arc electric
g=3, termică	[S ₃] = kg masa vaporilor	[P ₃] = J/kg entalpie specifică	[F ₃] = J/kg.m gradient al entalpiei [C ₃] = s		prelucrare electroerozivă, cu fascicul laser, cu fascicul de electroni
g=4, electrochimică	[S ₄] = C sarcina electrică	[P ₄] = V potențial electric	[F ₄] = V/m intensitatea câmpului electric [C ₄] = m ² /s.V		dopunere catodică, prelucrare electrochimică dimensională
g=5, chimică	[S ₅] = mol, kg.mol de substanță	[P ₅] = J/mol potențial izobar-izotermic	[F ₅] = J/mol.m gradient al potențialului chimic [C ₅] = e		eroziune chimică, cristalizare din soluție, sudare prin difuziune
g=6, mecanică	[S ₆] = m ³ volum de substanță în stare fluidă	[P ₆] = N/m ² presiune	[F ₆] = N/m ³ gradient de presiune, forță volumică [C ₆] = m ³ /s.kg		extrudare

vitezelor \vec{u} de generare a suprafețelor, cauza geometrică (informațională) a evoluției configurațiilor OP, OT, MA o constituie câmpul \vec{u} .

5.5.3. Model matematic pentru procesul de generare a suprafeței la prelucrarea dimensională fără contact cu copierea formei.

Modelul matematic al generării suprafeței la obiectul prelucrării OP și la obiectul de transfer OT în cazul prelucrării dimensionale fără contact cu copierea formei /307/ se elaborează în ipotezele: a) între OT și OP există un interstițiu cavi paralel de grosime δ mai mică (chiar cu un ordin de mărime) decât razele de curbură r_{KO} și r_{KP} ale suprafețelor active ale OT și OP; b) la marginile OT și OP se menține o diferență de potențial generalizat, $P_{gO} - P_{gP}$ datorită conectării OT și OP la un echipament G de gene-



rare a agenților fizico-chimici necesari desfășurării proceselor de generare a suprafeței cu copierea formei OT (descărcări electrice în impuls, electro-lit în câmp electric, suspensie abrazivă și bule cavitaționale în câmp ultrasonic etc.);

Fig.5.6. Portiune din spațiul de lucru la prelucrarea dimensională fără contact cu copierea formei.

c) condițiile fizico-chimice ale procesului de prelucrare sînt constante în spațiul de lucru al prelucrării. Parțial aceste ipoteze sînt prezentate în figura 5.6.

In cazul general obiectul de transfer OT și obiectul prelucrării OP se deplasează cu vitezele \vec{v}_p și \vec{v}_0 , modificarea configurației OP și OT în timpul procesului de generare a suprafețelor fiind descrisă de repartiția vitezelor \vec{u}_p și \vec{u}_0 (cele două câmpuri de generare a suprafețelor), de direcție coincidentă cu direcția normalei locale la suprafața activă a OP, respectiv OT. Așa cum s-a arătat (§ 5.5.2), deplasarea punctelor marginale ale OP și OT cu vitezele \vec{u}_p și \vec{u}_0 , - ca urmare a procesului de generare a suprafețelor, - este determinată de diferența de potențial generalizat $P_{gO} - P_{gP}$, prin intermediul forței generalizate de generare \vec{F}_g .

Conform (5.5.1) este evident că modulele vitezelor de

deplasare \vec{u}_P și \vec{u}_O sînt proporționale cu intensitatea forțelor de generare :

$$|\vec{u}_P| = C_{gP} \left| \vec{F}_g \right| = C_{gP} \left| \text{grad } P_g \right| \quad (5.52)$$

$$|\vec{u}_O| = C_{gO} \left| \vec{F}_g \right| = C_{gO} \left| \text{grad } P_g \right| \quad (5.53)$$

în care C_{gP} și C_{gO} sînt conductanțele de generare a suprafeței pentru OP și OT, dependente de mediul de lucru din interstițiu, materialele OP și OT, energia secundară E_2 transferată în spațiul de lucru (§ 2.2.2). Exprimînd legătura generală între intensitatea modificării suprafețelor OP și OT (vitezele \vec{u}_P ; \vec{u}_O) și intensitatea proceselor fizico-chimice din interstițiu pentru anumite caracteristici ale componentelor spațiului de lucru (P_{gP} ; P_{gO} ; C_{gP} ; C_{gO}), relațiile (5.52) și (5.53) reprezintă ecuațiile fizice generale ale procesului de generare a suprafețelor, fiind similare cu ecuațiile constitutive din mecanica mediilor continue.

În cazul cînd potențialele P_{gO} și P_{gP} sînt constante în timpul procesului de generare a suprafeței (ipoteza c), se poate scrie :

$$\left| \text{grad } P_g \right| \approx \left| \frac{P_{gO} - P_{gP}}{\delta} \right| = \left| \frac{\Delta P_g}{\delta} \right| \quad (5.54)$$

iar relațiilor (5.52) și (5.53) le corespunde :

$$\vec{u}_P = C_{gP} \left| \frac{P_{gO} - P_{gP}}{\delta} \right| \vec{n}_P = g_P (C_{gP}, |\Delta P_g|, \delta) \vec{n}_P \quad (5.55)$$

$$\vec{u}_O = C_{gO} \left| \frac{P_{gO} - P_{gP}}{\delta} \right| \vec{n}_O = g_O (C_{gO}, |\Delta P_g|, \delta) \vec{n}_O \quad (5.56)$$

în care \vec{n}_P și \vec{n}_O sînt versorii normalelor locale la suprafața activă a obiectului prelucrării OP și a obiectului de transfer OT (s-a acceptat sensul pozitiv pentru versorii normalelor dirijați în interior). Relațiile (5.55) și (5.56) arată că, în cazul unui proces de generare cu caracteristici invariabile (C_{gP} , C_{gO} , $|\Delta P_g|$ constante) aspectul fizic se reduce în final la o exprimare pur geometrică..

În continuare se poate trece la elaborarea modelului matematic general al procesului de generare a suprafețelor OP și OT, legînd aspectul fizic de dinamica modificării în timp a suprafețelor active ale OP și OT.

În acest scop se consideră la un moment t ecuația suprafeței active a OP :

$$f_P(X_P, Y_P, Z_P, t) = 0 \quad (5.57)$$

respectiv ecuația suprafeței active a OT :

$$f_0(X_0, Y_0, Z_0, t) = 0 \quad (5.58)$$

unde X_p, Y_p, Z_p sînt coordonatele punctelor marginale ale OP, iar X_0, Y_0, Z_0 sînt coordonatele punctelor marginale ale OT. Suprafețele se presupun netede sau netede pe porțiuni, ceea ce asigură existența derivatelor parțiale ale funcțiilor (5.57) și (5.58).

Fie funcțiile :

$$\Phi_1 = f_p(X, Y, Z, t) \quad (5.59)$$

$$\Phi_2 = f_0(X, Y, Z, t) \quad (5.60)$$

Se observă că pe suprafața OP ($X = X_p; Y = Y_p; Z = Z_p$) respectiv pe suprafața OT ($X = X_0; Y = Y_0; Z = Z_0$) rezultă conform (5.57) și (5.58) :

$$\Phi_1 = 0 \quad ; \quad \Phi_2 = 0 \quad (5.61)$$

Prin aceasta, suprafețelor OP și OT li s-au atribuit cîmpurile scalare Φ_1 și Φ_2 . Această atribuire se poate face în orice moment, ceea ce înseamnă că procesul de generare a suprafețelor îi corespund cîmpurile dinamice Φ_1 și Φ_2 , cu niveluri potențiale $\Phi_1 = 0$ și $\Phi_2 = 0$, care se deplasează în spațiu.

Considerînd diferențiala totală a funcției Φ_1 sau a funcției Φ_2 (pentru simplificare nu se vor scrie indicii), rezultă:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dt} + \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \cdot \frac{dY}{dt} + \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \cdot \frac{dZ}{dt} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (5.62)$$

sau, în exprimare vectorială :

$$\vec{u} \cdot \text{grad} \Phi + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (5.63)$$

în care :

$$\text{grad} \Phi = \vec{i} \frac{\partial \Phi}{\partial X} + \vec{j} \frac{\partial \Phi}{\partial Y} + \vec{k} \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \quad (5.64)$$

$$\vec{u} = \vec{i} \frac{dX}{dt} + \vec{j} \frac{dY}{dt} + \vec{k} \frac{dZ}{dt} \quad (5.65)$$

Deoarece:

$$\vec{u} \cdot \text{grad} \Phi = |\vec{u}| \cdot |\text{grad} \Phi| \cdot \cos(\vec{u}, \text{grad} \Phi) \quad (5.66)$$

iar $\vec{u} \parallel \text{grad} \Phi$, rezultă :

$$\sqrt{u_X^2 + u_Y^2 + u_Z^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Z}\right)^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (5.67)$$

Relația (5.63) pune în evidență legătura dintre viteza \vec{u} de deplasare a punctelor marginale ale OP sau OT și funcția Φ , care permite cunoașterea suprafeței OP sau OT, în orice moment.

Relațiile (5.55) sau (5.56) împreună cu (5.63) reprezintă modelul matematic general al generării suprafeței la prelucrarea dimensională fără contact cu copierea formei. Revenind la indicierrea funcției Φ și ținând seama de notațiile (5.59) și (5.60), pentru cazul generării suprafeței la obiectul prelucrării OP (piesa P) rezultă :

$$\left. \begin{aligned} \vec{u}_P \cdot \text{grad } f_P + \frac{\partial f_P}{\partial t} &= 0 \\ \vec{u}_P &= \varepsilon_P (C_{gP}, |\Delta P_g|, \delta) \vec{n}_P \end{aligned} \right\} \quad (5.68)$$

respectiv pentru cazul generării suprafeței (uzării) la obiectul de transfer OT, rezultă :

$$\left. \begin{aligned} \vec{u}_O \cdot \text{grad } f_O + \frac{\partial f_O}{\partial t} &= 0 \\ \vec{u}_O &= \varepsilon_O (C_{gO}, |\Delta P_g|, \delta) \vec{n}_O \end{aligned} \right\} \quad (5.69)$$

Dacă, față de un sistem de axe OXYZ, OP și OT au o mișcare de translație caracterizată de vectorii vitezelor \vec{v}_P respectiv \vec{v}_O (fig.5.6), ecuațiile (5.68) și (5.69) devin :

$$\left. \begin{aligned} (\vec{u}_P + \vec{v}_P) \cdot \text{grad } f_P + \frac{\partial f_P}{\partial t} &= 0 \\ \vec{u}_P &= \varepsilon_P (C_{gP}, |\Delta P_g|, \delta) \vec{n}_P \end{aligned} \right\} \quad (5.70)$$

$$\left. \begin{aligned} (\vec{u}_O + \vec{v}_O) \cdot \text{grad } f_O + \frac{\partial f_O}{\partial t} &= 0 \\ \vec{u}_O &= \varepsilon_O (C_{gO}, |\Delta P_g|, \delta) \vec{n}_O \end{aligned} \right\} \quad (5.71)$$

La aceste sisteme se adaugă legătura între vitezele \vec{u}_P și \vec{u}_O , necesară ca, prin avans să se asigure $\delta = \text{const.}$, cel puțin în zona unde grosimea δ a interstițiului are valoare minimă.

De exemplu, în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei, când se poate considera practic $\delta \approx \text{constant}$ în întregul interstițiu, este valabilă relația :

$$\frac{\vec{u}_P}{\cos(\vec{n}_P, \vec{v})} + \frac{\vec{u}_O}{\cos(\vec{n}_O, \vec{v})} = \vec{v} = \vec{v}_P + \vec{v}_O \quad (5.72)$$

în care \vec{v} - viteza de avans a OT în raport cu OP.

Pe baza relațiilor (5.70), (5.71) și (5.72) se poate elabora modelul matematic al generării suprafeței pentru oricare din metodele de prelucrare fără contact cu copierea formei, caracterizate de relațiile (5.55) și (5.56) specifice.

5.5.4. Model matematic pentru procesul de generare a suprafeței electrodului (uzare) la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

În conformitate cu concluziile de la § 5.5.1, se trece în continuare la stabilirea legilor uzării electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică, în condițiile eliminării influenței evacuării deșeurilor (prima etapă a cercetării generării suprafeței, § 5.5.1) /305/.

Ipotezele care stau la baza elaborării modelului matematic sînt (§ 5.5.2 și 5.5.3): a) între electrodul de transfer ET și obiectul prelucrării OP există un interstițiu cvasiparalel de grosime δ mai mică (chiar cu un ordin de mărime) decît razele de curbura r_{KE} și r_{KP} ale suprafețelor active ale ET și OP; b) la marginile ET și OP se menține diferența de potențial generalizat ΔP_g /J/kg/, datorită conectării ET și OP, aflate în lichidul de lucru LL, la generatorul de impulsuri de tensiune și curent al utilajului de prelucrare prin eroziune electrică cu copierea formei; c) condițiile fizico-chimice ale procesului de prelucrare sînt constante în spațiul de lucru al prelucrării și nu se formează aglomerări de deșeurii în interstițiu (evacuarea în afara interstițiului a produselor solide și gazoase ale eroziunii este simultană cu prelevarea de la OP și ET); d) prelevarea de substanță de la OP și ET se face numai pe direcția normalei locale la suprafețele active; e) se consideră situația cea mai frecvent utilizată în practica prelucrării, cînd OP este instalat pe masa mașinii ($\vec{v}_p = 0$), iar ET este fixat în dispozitivul portelectrod și în raport cu OP este traslatat vertical cu viteza \vec{v}_E de către sistemul de avans automat al mașinii de prelucrare.

Se pornește de la modelul general al generării suprafeței la obiectul de transfer OT în cazul prelucrării dimensionale fără contact cu copierea formei (5.70), (5.71), (5.72), ținînd seama că la prelucrarea prin eroziune electrică obiectul de transfer OT (indici O) se numește electrod de transfer ET (indici E) :

$$(\vec{u}_E + \vec{v}_E) \text{ grad } f_E + \frac{\partial f_E}{\partial t} = 0 \quad (5.73)$$

$$\vec{u}_E = g_E (C_{gE}, |\Delta P_g|, \delta) \vec{n}_E \quad (5.74)$$

$$\frac{\vec{u}_P}{\cos(\vec{n}_P, \vec{v})} + \frac{\vec{u}_E}{\cos(\vec{n}_E, \vec{v})} = \vec{v} = \vec{v}_E \quad (5.75)$$

în care: \vec{u}_E - viteza de deplasare (de uzare), pe normala locală la suprafața activă a ET, a punctelor marginale ale suprafeței active a electrodului; \vec{v}_E - viteza de translație verticală a ET; $f_E(X_E, Y_E, Z_E, t)$ - ecuația suprafeței active a ET; C_{gE} - conduc-tanța generării suprafeței (uzării) ET, dependentă de caracteristi-cile lichidului de lucru LL din interstițiul ET-OP, de caracteris-ticile de material ale ET-OP, de caracteristicile impulsurilor de tensiune și curent în spațiul de lucru etc.; \vec{n}_E - versorul normalei locale la suprafața activă a ET; \vec{u}_P - viteza de deplasare (de pre-levare), pe normala locală la suprafața prelucrată a OP, a puncte-lor marginale ale suprafeței active a OP; \vec{n}_P - versorul normalei locale la suprafața activă a OP; $\vec{v} = \vec{v}_P + \vec{v}_E = \vec{v}_E$ - viteza de a-vans a ET în raport cu OP, egală, în ipoteza e ($\vec{v}_P = 0$), cu viteza de translație verticală a ET.

Dacă :

$$Z_E = f_2 (X_E, Y_E, t) \quad (5.76)$$

este ecuația suprafeței ET la momentul t, atunci, cu notațiile din § 5.5.2, ecuația suprafeței ET se mai scrie :

$$f_E = Z_E - f_2(X_E, Y_E, t) = 0 \quad (5.77)$$

iar funcția ce descrie cîmpul dinamic Φ_2 este :

$$\Phi_2 = Z - f_2(X, Y, t) \quad (5.78)$$

Cu această considerare se trece la explicitarea termenii-lor din relația (5.73).

Conform notațiilor din figura 5.7, viteza de uzare pe normala locală la suprafața activă a ET este :

$$\vec{u}_E = \frac{\Delta h_{En}}{\Delta t} \vec{n}_E \quad (5.79)$$

cea ce pe baza relațiilor (5.73), (5.77), (5.78), (5.79), permite să se scrie pentru primul termen al relației (5.73) :

$$\begin{aligned} \vec{u}_E \cdot \text{grad } \Phi_2 &= \frac{\Delta h_{En}}{\Delta t} \vec{n}_E \cdot \text{grad } \Phi_2 = \\ &= \frac{\Delta h_{En}}{\Delta t} |\vec{n}_E| \cdot |\text{grad } \Phi_2| \cdot \cos(\vec{n}_E, \text{grad } \Phi_2) = \\ &= \frac{\Delta h_{En}}{\Delta t} |\text{grad } \Phi_2| = \frac{\Delta h_{En}}{\Delta t} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial Y}\right)^2} \end{aligned} \quad (5.80)$$

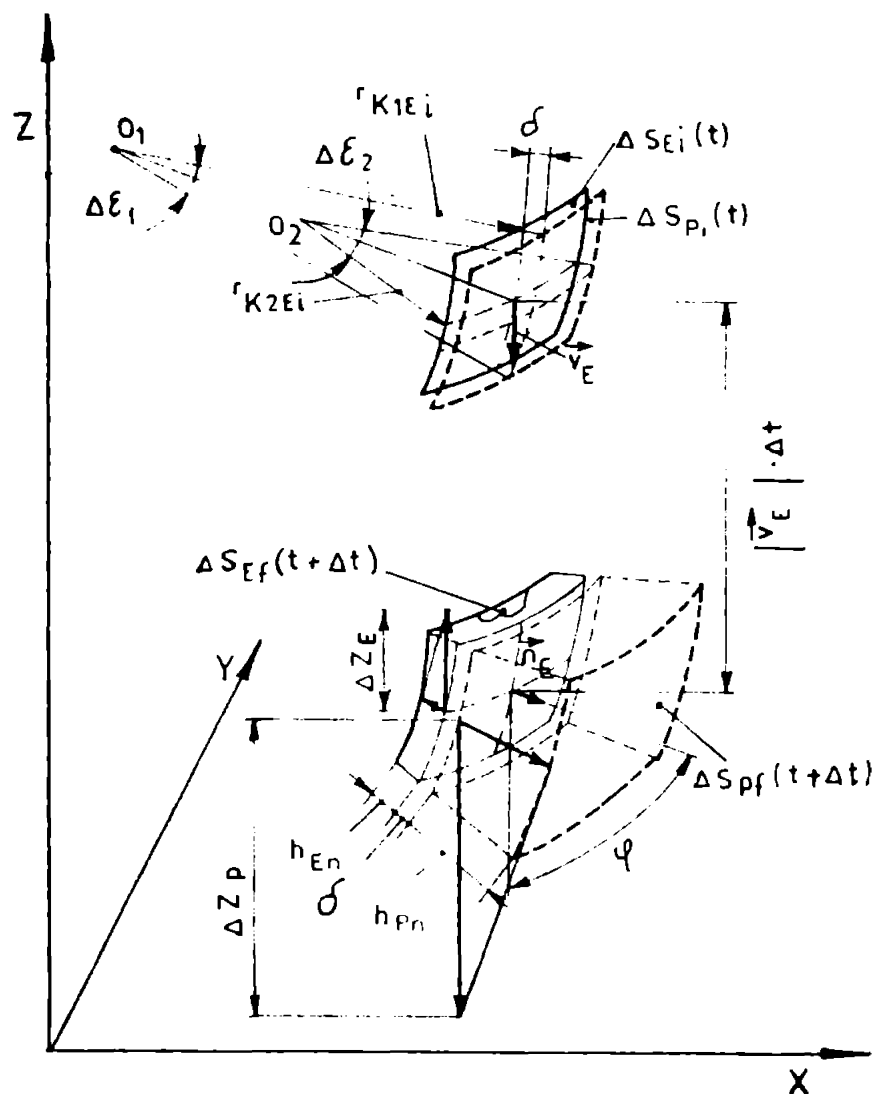


Fig.5.7. Geometria spațiului de lucru elementar pentru faza staționară de durată Δt a prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.

unde s-a ținut seama de paralelismul dintre direcția normalei locale și a gradientului într-un punct oarecare al suprafeței active a ET, respectiv că :

$$\text{grad } \Phi_2 = -\vec{i} \frac{\partial f_2}{\partial X} - \vec{j} \frac{\partial f_2}{\partial Y} + \vec{k} \quad (5.81)$$

$$|\text{grad } \Phi_2| = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial Y}\right)^2} \quad (5.82)$$

Exprimînd Δh_{En} prin ΔZ_E (fig.5.7) :

$$\Delta h_{En} = \Delta Z_E \cos(\vec{k}, \vec{n}_E) = -\Delta Z_E \cdot \cos \varphi \quad (5.83)$$

Pentru a determina $\cos \varphi$, se consideră produsul scalar $\vec{k} \cdot \text{grad } \Phi_2$. Pe de o parte :

$$\begin{aligned} \vec{k} \cdot \text{grad } \Phi_2 &= |\vec{k}| |\text{grad } \Phi_2| \cdot \cos(\vec{k}, \text{grad } \Phi_2) = \\ &= -|\text{grad } \Phi_2| \cdot \cos \varphi = -\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial y}\right)^2} \cdot \cos \varphi \quad (5.84) \end{aligned}$$

iar pe de altă parte :

$$\vec{k} \cdot \text{grad } \Phi_2 = \vec{k} \cdot \left(-\vec{i} \frac{\partial f_2}{\partial x} - \vec{j} \frac{\partial f_2}{\partial y} + \vec{k} \right) = 1 \quad (5.85)$$

Din (5.84) și (5.85) rezultă :

$$\cos \varphi = -\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial y}\right)^2}} \quad (5.86)$$

Ținînd seama de (5.83) și (5.86), relația (5.80) devine :

$$\vec{u}_E \cdot \text{grad } \Phi_2 = \frac{\Delta Z_E}{\Delta t} \quad (5.87)$$

Conform relațiilor (5.73), (5.77), (5.78) și figurii 5.7, al doilea termen al ecuației (5.73) este :

$$\vec{v}_E \cdot \text{grad } \Phi_2 = -\vec{k} \cdot \vec{v}_E \left(-\vec{i} \frac{\partial f_2}{\partial x} - \vec{j} \frac{\partial f_2}{\partial y} + \vec{k} \right) = -\vec{v}_E \quad (5.88)$$

Ținînd seama de (5.73), (5.77) și (5.78) pentru al treilea termen al relației (5.73) rezultă :

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = -\frac{\partial f_2}{\partial t} \quad (5.89)$$

Înlocuind (5.87), (5.88), (5.89) în (5.73) se obține :

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} = \frac{\Delta Z_E}{\Delta t} - \vec{v}_E \quad (5.90)$$

sau

$$f_2(X, Y, t + \Delta t) = f_2(X, Y, t) + \Delta Z_E - \vec{v}_E \cdot \Delta t \quad (5.91)$$

Relația (5.91) este în concordanță cu mecanismul de generare a suprafeței la electrodul EF în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei (fig.5.7) și reprezintă modelul

matematic general al uzării ET, în condițiile când obiectul prelucrării OP este fix iar ET se deplasează paralel cu axa OZ, cu viteza de translație \vec{v}_E . Pentru $Y = \text{const.}$ relația (5.91) devine identică cu un model particular /64/, demonstrat pe cale geometrică simplificată.

Pe de altă parte avansul ΔZ al electrodului este (fig. 5.7) :

$$\Delta Z = v_E \cdot \Delta t = \Delta Z_E + \Delta Z_P \quad (5.92)$$

Inlocuind (5.92) în (5.91) se obține :

$$f_2(X, Y, t + \Delta t) = f_2(X, Y, t) - \Delta Z_P \quad (5.93)$$

Cu ajutorul modelelor matematice (5.91) sau (5.93), procesul de generare a suprafeței (uzare) la ET poate fi studiat în succesiuni de secvențe de durată Δt .

În explicitarea termenilor ΔZ_P sau ΔZ_E se pornește de la relația de definiție a uzurii relative volumice a electrodului, în ipoteza că normala la suprafața elementului de suprafață inițial ΔS_{Ei} al ET (la momentul t) și normala la suprafața elementului de suprafață inițial ΔS_{Pi} al OP, sînt paralele, avînd același unghi φ în raport cu axa OZ (fig. 5.7). Pentru perechea de elemente de suprafață ΔS_{Ei} și ΔS_{Pi} , în ipotezele c și d, uzura relativă volumică γ_0 (vezi relațiile 5.1 și 5.2) poate fi considerată constantă în orice interval de timp Δt :

$$\gamma_0 = \frac{\Delta V_E}{\Delta V_P} = \frac{h_{En} \cdot \Delta A_E}{h_{Pn} \cdot \Delta A_P} \quad (5.94)$$

în care: ΔV_E - volumul uzurii elementare a electrodului; ΔV_P - volumul prelevării elementare de la obiectul prelucrării; h_{En} - grosimea locală pe direcția normalei a stratului de substanță uzat la ET în perioada de timp Δt ; h_{Pn} - grosimea locală pe direcția normalei a stratului de substanță prelevat de la OP în perioada Δt ; $\Delta A_E = \Delta V_E / h_{En}$ și $\Delta A_P = \Delta V_P / h_{Pn}$ - ariile elementare respective.

Ținînd seama de definiția uzurii relative liniare locale λ_n pe direcția normalei la elementele de suprafață activă, de notațiile din figura 5.7 și de (5.94), se poate scrie :

$$\lambda_n = \frac{h_{En}}{h_{Pn}} = \frac{\Delta V_E \cdot \Delta A_P}{\Delta V_P \cdot \Delta A_E} \quad (5.95)$$

In cazul curburilor pozitive (raze convexe ale suprafeței

active a ET) se poate scrie pe baza figurii 5.7 :

$$\frac{\Delta A_P}{\Delta A_E} = \lambda_n \cdot \frac{\Delta V_P}{\Delta V_E} =$$

$$= \lambda_n \frac{h_{Pn}(r_{K1Ei} + h_{Pn} + \delta)(r_{K2Ei} + h_{Pn} + \delta) \Delta \varepsilon_1 \cdot \Delta \varepsilon_2}{h_{En} \cdot r_{K1Ei} \cdot r_{K2Ei} \cdot \Delta \varepsilon_1 \cdot \Delta \varepsilon_2} \quad (5.96)$$

Din (5.95), (5.94) și (5.96) rezultă pentru momentul $t + \Delta t$:

$$\lambda_n = \gamma_0 \left(1 + \frac{h_{Pn} + \delta}{r_{K1Ei}}\right) \left(1 + \frac{h_{Pn} + \delta}{r_{K2Ei}}\right) \quad (5.97)$$

în care: r_{K1Ei} - raza de curbură inițială (la momentul t) a elementului de suprafață ΔS_{Ei} a ET, în planul de avans, determinat de normala \vec{n}_E și direcția de avans; r_{K2Ei} - raza de curbură inițială a elementului de suprafață ΔS_{Ei} a ET, în planul care conține normala \vec{n}_E și este perpendicular pe planul de avans.

In cazul curburilor negative (zone concave ale suprafeței active a ET) se demonstrează analog că, pentru momentul $t + \Delta t$, este valabilă relația :

$$\lambda_n = \gamma_0 \left(1 - \frac{h_{Pn} + \delta}{r_{K1Ei}}\right) \left(1 - \frac{h_{Pn} + \delta}{r_{K2Ei}}\right) \quad (5.98)$$

Pe direcția de avans OZ se definește uzura relativă liniară locală λ_z :

$$\lambda_z = \frac{\Delta Z_E}{\Delta Z_P} \quad (5.99)$$

în care grosimea ΔZ_E , pe direcția de avans, a stratului de substanță uzat la ET la abscisa X respectiv grosimea ΔZ_P , pe direcția de avans, a stratului de substanță prelevat de la OP la abscisa $X + \delta \cdot \sin \varphi_i$, sînt date de relațiile :

$$\Delta Z_E = \frac{h_{En}}{\cos \varphi_i} ; \quad \Delta Z_P = \frac{h_{Pn}}{\cos \varphi_i} \quad (5.100)$$

Din (5.99), (5.97), (5.98), (5.100) rezultă :

$$\lambda_z = \gamma_0 \left(1 \pm \frac{\Delta Z_P \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{K1Ei}}\right) \left(1 \pm \frac{\Delta Z_P \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{K2Ei}}\right) \quad (5.101)$$

$$\Delta Z_E = \gamma_0 \cdot \Delta Z_P \left(1 \pm \frac{\Delta Z_P \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{K1Ei}}\right) \left(1 \pm \frac{\Delta Z_P \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{K2Ei}}\right) \quad (5.102)$$

Din (5.92) și (5.102) se obține, pentru orice punct de coordonate X_E, Y_E, Z_E date, următoarea dependență :

$$\Delta Z_P = f(\gamma_0, r_{K1Ei}, r_{K2Ei}, \delta, \Delta Z, \varphi_i) \quad (5.103)$$

În practica prelucrării se pot determina prin încercări și măsurători valorile mărimilor γ_0, δ . Valorile razelor de curbură r_{K1Ei}, r_{K2Ei} și a unghiurilor φ_i pentru configurația suprafeței active inițiale a electrodului sînt date în documentația tehnică de fabricare a acestuia. Dacă se studiază uzarea ET în succesiuni de secvențe Δt corespunzătoare unor avansuri ΔZ de valori convenabil alese, se pot calcula valorile ΔZ_P respectiv ΔZ_E , deci se poate determina cu relația (5.93) configurația suprafeței active a ET la sfîrșitul secvenței Δt . După determinarea razelor de curbură pentru noua configurație, cu relația (5.103) se calculează valorile ΔZ_P pentru secvența Δt următoare, ciclul descris reluîndu-se succesiv, în conformitate cu necesitățile studiului.

Modelul matematic elaborat permite simularea pe calculatorul electronic numeric a procesului de generare a suprafeței (uzare) a electrodului la copierea formei acestuia, în cazul cînd se face simultan prelevarea și evacuarea din interstițiu a produselor solide și gazoase ale eroziunii electrice. Modelul matematic este valabil și în cazul altor cinematici de generare a suprafeței, cînd se copiază profilul electrodului.

6. Cercetări experimentale privind uzarea electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

6.1. Obiective și metodică a cercetărilor experimentale.

Așa cum s-a arătat în subcapitolul 3.3 și în capitolele 4 și 5, procesul de uzare a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei prezintă complexitate deosebită, este prea puțin studiată în literatură deși determină în mod hotărîtor performanțele procedurii. Acest fapt a necesitat aprofundarea, în capitolul 5, a studiului teoretic al uzării electrodului și impune în continuare cercetări experimentale, în vederea verificării corectitudinii modelului matematic elaborat și explicației propuse pentru mecanismul de uzare a electrodului.

Cercetările experimentale ale procesului macroscopic de

uzare a electrozului ET la prelucrarea electroerozivă cu copierea formei, efectuate de alți cercetători, se pot grupa în cîteva categorii :

a) cercetări de „constatare” a uzurii electrodului ET, care nu au urmărit verificarea cantitativă sau calitativă a vreunui model matematic elaborat în prealabil, ci obținerea de diverse informații despre procesul de uzare /27, 62, 188, 238, 248, 264, 331, 330, 444/;

b) cercetări necesare pentru determinarea unor modele matematice sub forma unor ecuații de regresie, valabile pentru cazuri cu totul particulare ale uzării ET /114, 115, 263/ ;

c) cercetări de verificare a corectitudinii unor modele matematice particulare pentru uzarea ET /63, 64, 186/.

Pentru modelarea și simularea procesului de generare a suprafeței la piesă respectiv pentru proiectarea ET cu calculatorul electronic numeric, prezintă importanță deosebită numai ultima categorie de cercetări (§ 5.5.1).

Din păcate, cercetările efectuate de Crookall, Fereday, Moncrieff /63, 64/, nu au reușit să obțină o concordanță satisfăcătoare între rezultatele simulării pe calculatorul electronic numeric a procesului de uzare și rezultatele cercetărilor experimentale efectuate pentru cazul electrozilor plăci subțiri. Aceasta se datorește în principal imperfecțiunii modelului matematic elaborat, simplificărilor admise în cadrul analizei numerice și considerării voit - simplificate a unor racordări circulare ale profilelor de uzare la muchii.

Pe baza celor expuse mai sus și a concluziilor formulate la § 5.5.1, se adoptă în continuare următoarele obiective și metodică a cercetării experimentale în cadrul spațiului limitat al acestei lucrări :

1) cercetarea procesului de uzare la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrozi plăci subțiri în condiții de evacuare practic instantanee a deșeurilor solide din interstițiu, comparativ cu dinamica uzării electrozilor cilindrici în condiții de evacuare naturală a deșeurilor în afara interstițiului;

2) verificarea imediată a corectitudinii modelului matematic elaborat la § 5.5.4, prin compararea uzurii relative liniare calculate și a celei măsurate în zona rotunjirii muchiilor electrozilor de transfer tip plăci subțiri;

3) verificarea corectitudinii explicației teoretice propuse la § 5.3.1 pentru mecanismul macroscopic general al procesului

de uzare a electrodului de transfer, prin compararea ei cu rezultatele experimentale obținute la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrozi cilindrici, în condiții de evacuare naturală a deșeurilor în afara interstițiului.

6.2. Mijloace, regimuri de lucru și metode utilizate la cercetarea experimentală.

Cercetările experimentale au utilizat următoarele compo-
nente ale sistemului tehnologic SATO :

1) utilaj de prelucrare prin eroziune electrică tip EROSIMAT SFE 30-C/457/ cu generator de impulsuri de tip RC, ales în scopul obținerii de uzuri ridicate la rugozități acceptabile și productivități suficient de mari, cerute de durata convenabilă pentru încercări;

2) lichid de lucru petrol fără nici un material de adaos sau protecție, filtrat în timpul procesului de către sistemul de circulație al utilajului EROSIMAT SFE 30-C ;

3) obiecte ale prelucrării OP din oțel aliat de scule C 120 (STAS 3611-66), călite-revenite la duritatea 56...58 HRC; în cazul electrozilor plăci, OP au avut forma unor plăci prismatice drepte cu dimensiunile 35x35x3 mm, iar în cazul prelucrării cu electrozi cilindrici OP au avut forma unor prisme compuse din două bucăți asamblate cu șuruburi, pentru ca în final, după terminarea prelucrării la diferite adâncimi, să fie posibilă măsurarea profilurilor OP în planul axial;

4) electrozi de transfer din cupru Cu 99,9 (STAS 270/1-74, STAS R 6388-68) în formă de plăci prismatice drepte cu dimensiunile /mm/ : lungime 80, grosime 3, lățime 8; 11,3; 16; 20; respectiv ET de formă cilindrică cu diametrul /mm/: 8; 11,3; 16; 20, din același material;

5) regimuri de lucru programate: a) regim electric mijlociu, avînd în circuitul de încărcare al generatorului de impulsuri $C = 18 \mu F$, $R = 103 \Omega$, iar în spațiul de lucru o tensiune de lucru medie de străpungere măsurată $U = (170 \pm 5) V$, un curent mediu $I_{med} = (3,8 \pm 0,2) A$, energia descărcării $W_i \approx 0,3 J$, frecvența impulsurilor de curent $f_i \approx 400 Hz$ /457/; b) circulație a lichidului de lucru în cadrul cuvei cu un debit $Q_L \approx 15 l/min$, evacuarea deșeurilor solide în afara interstițiului ET-OP făcîndu-se natural, fie direct și practic instantaneu cu prelevarea lor (la electrozii plăci subțiri), fie în urma mărunțirii avansate, după un timp cu atît mai îndelungat de la momentul separării

lor din OP și ET, cu cît adîncimea prelucrării este mai mare (la electrozi ET cilindrici); c) reglare a sistemului de avans automat al ET, astfel încît să se realizeze întotdeauna randament optim și stabilitate a prelucrării.

În afara aparatului pentru măsurarea parametrilor electrice U și I_{med} s-au mai utilizat următoarele aparate și metode de măsurare :

6) măsurarea maselor OP și ET s-a făcut cu o precizie de $2 \cdot 10^{-4}$ g pe balanța analitică, iar volumele prelevate de la electrozi s-au determinat cunoscînd scăderea masei Δm și a densității ρ , $V = \Delta m \cdot \rho$;

7) măsurarea coordonatelor profilurilor ET și OP s-a făcut pe un proiector de profile MP 320 Carl Zeiss-Jena, la o mărire de 10 ori;

8) densitățile ρ_E și ρ_O ale materialelor ET și OP s-au determinat prin metoda dublei cîntăriri;

9) duratele prelucrărilor s-au măsurat cu cronometrul.

Valorile obținute în urma prelucrării rezultatelor seriilor de experiențe reprezintă media a cel puțin 3 măsurători.

În legătură cu ariile transversale ale electrozilor de transfer, trebuie precizat că ele sînt de 1,3...4,5 ori mai mari la electrozii cilindrici ($A_{tE} = 50; 100; 200; 300 \text{ mm}^2$) față de electrozii plăci ($A_{tE} = 28; 40; 58; 66 \text{ mm}^2$). În condițiile experimentării la regim de lucru constant, aceasta are drept consecință densități de curent j_{med} de 1,8...4,5 ori mai mari la prelucrarea cu electrozi plăci față de prelucrarea cu electrozi cilindrici, deci valori ale uzurii relative γ_0 mai mari la electrozii plăci. S-a preferat inegalitatea densităților de curent față de inegalitatea dintre diametrul și lățimea ET (erau necesare lățimi ale ET plăci de 16, 33, 66, 100 mm pentru a asigura j_{med} identic), deoarece cel mai important aspect îl constituie comparabilitatea profilurilor de uzare a celor două tipuri de electrozi, pentru diverse diametre și adîncimi de prelucrare.

6.3. Rezultatele cercetărilor experimentale ale procesului de uzare a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

6.3.1. Cercetări experimentale comparative ale uzării electrozilor plăci subțiri și electrozilor cilindrici.

În condițiile precizate la subcapitolul 6.2 s-au făcut

prelucrări electroerozive cu copierea formei la adâncimi în obiectul prelucrării $L_{Pmax} = 1; 2; 3; 5; 10; 15; 20; 25$ mm (pentru electrozi plăci subțiri) și $L_{Pmax} = 5; 10; 15; 20; 25$ (pentru electrozi ET cilindrici).

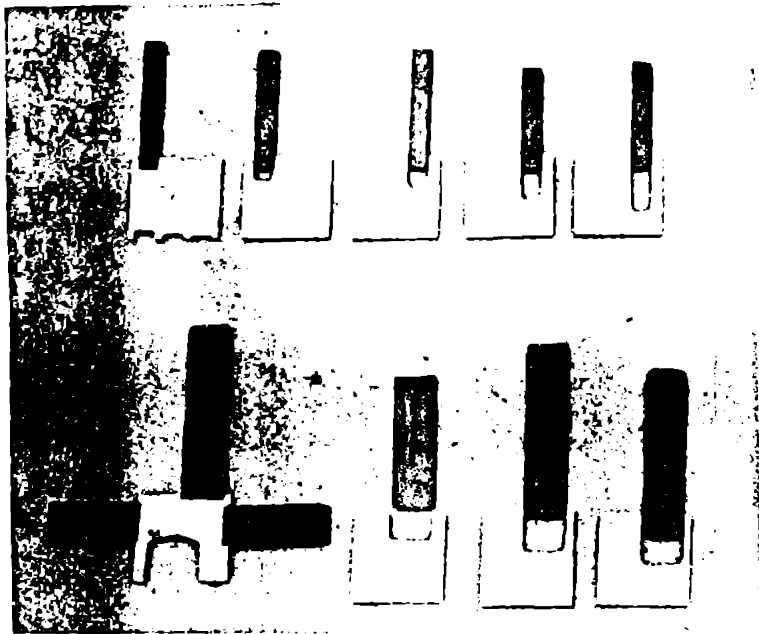


Fig.6.1. Electrozi ET și obiecte prelucrate OT utilizate la cercetarea experimentală a uzurii electrozilor.

Figura 6.1 prezintă aspectul final al electrozilor ET și obiectelor OP, la sfârșitul prelucrărilor menționate.

Măsurătorile de timpi operativi t , respectiv cele de mase, densități, dimensiuni liniare și unghiulare etc. efectuate cu metodele prezentate anterior și prelucrarea rezultatelor experimentale obținute

permite evidențierea unui număr mare de dependențe. Dintre acestea, conform obiectivului stabilit la subcapitolul 6.1, s-au luat în considerare doar dependențele relevante dintre variabilele de ieșire (de performanță, intermediare) și cele de intrare (comandate) ale procesului de uzare considerat sub aspect macroscopic (fig. 6.2),

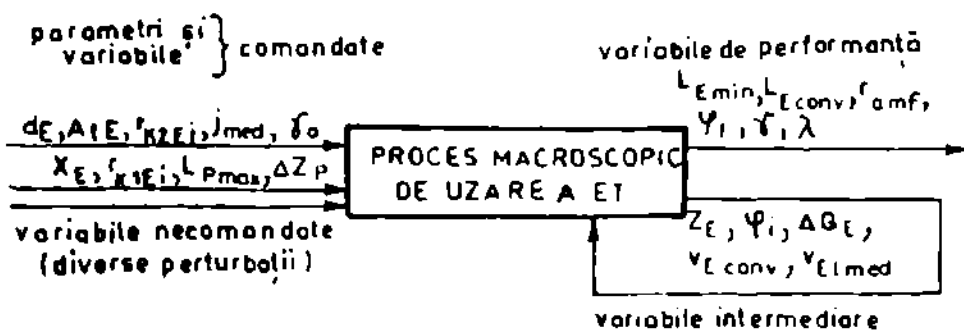


Fig.6.2. Variabile relevante considerate în cercetarea experimentală macroscopică a uzurii electrozilor la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

ra 6.2 este precizată în tabelul 5.3, relația (5.16) și anterior în capitolul 6, rămân de definit doar: X_E, Z_E - coordonatele punctelor marginale ale (profilului) electrodului ET în planul XOZ care conține direcția de avans paralelă cu OZ; r_{amf} /mm/ - raza aproximată la muchia electrodului ET uzat, la sfârșitul (finalul) prelucrării

sau secvenței de durată Δt .

Figurile 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 prezintă comparativ pentru electrozi plăci și cilindrici dependențele ce definesc profilul :

$$Z_E = f(X_E, L_{Pmax}, d_E, j_{med}) \quad (6.1)$$

la patru valori ale parametrului lățimea/diametrul electrodului $d_E = 8; 11,3; 16; 20$ mm.

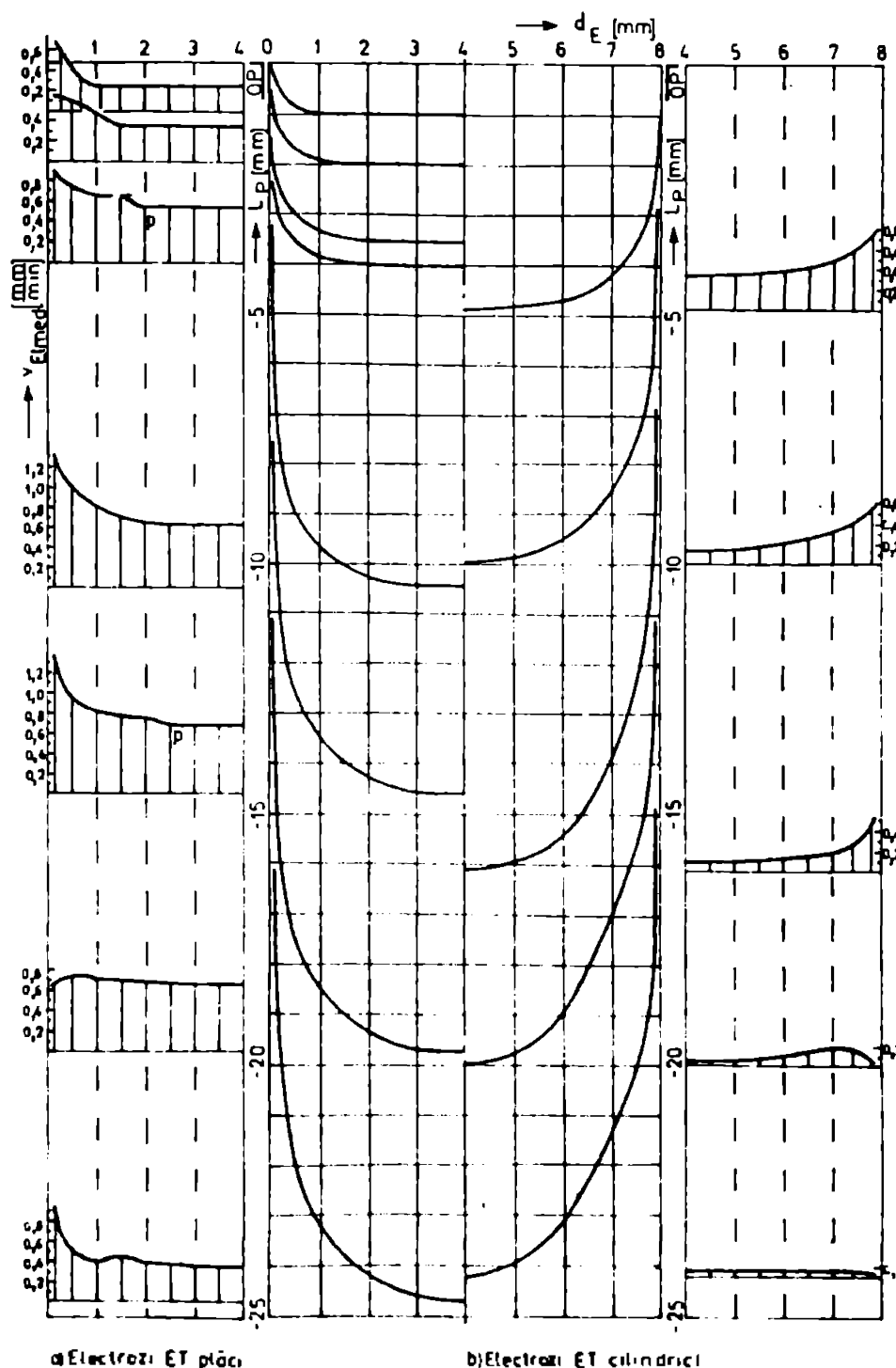


Fig.63. Profilurile efective și vitezele v_{Elmed} la diverse adâncimi de prelucrare pentru $d_E = 8$ mm.

Se observă imediat, chiar fără a efectua măsurări ale razelor approximate la muchii, că la adâncimi ale prelucrării L_{Pmax} comparabile există relația :

$$r_{\text{amf.plăci}} \ll r_{\text{amf.cilindr}} \quad (6.2)$$

explicată de uzura suplimentară a ET cilindrici, ca urmare a des-

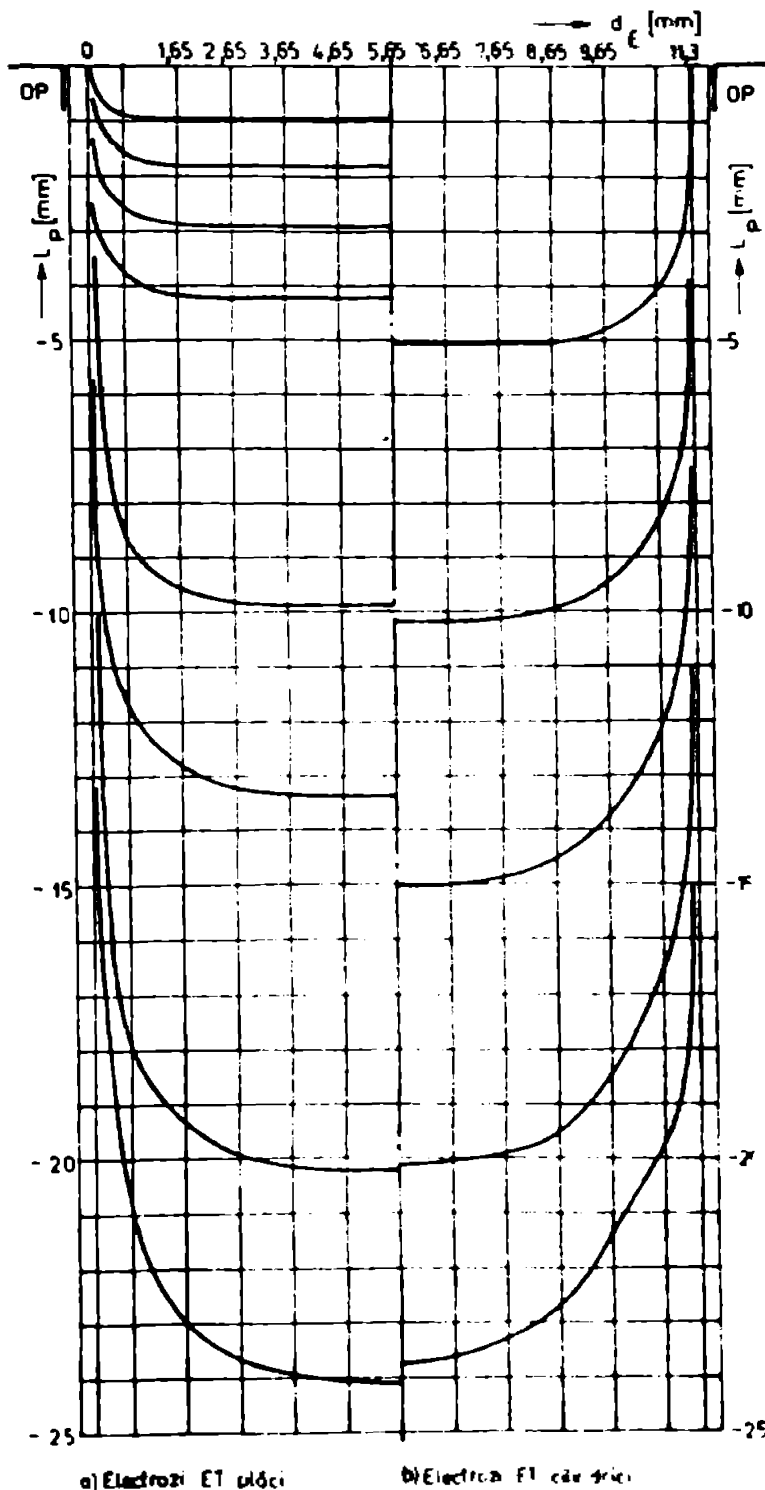


Fig.6.4. Profilurile efective ale electrozilor de lățime/diametru $d_E = 11,3$ mm la diverse adâncimi de prelucrare L_{Pmax} .

tă claritate efectul eliminării descărcărilor de mărunțire N_{pm} la prelucrarea cu electrozi plăci: constanța razelor $r_{\text{amf.plăci}}$ independent de valorile d_E și j_{med} , respectiv cuasiconstanța uzurii relative volumice γ funcție de L_{Pmax} . Descărcările de mărunțire a deșeurilor solide N_{pm} desfășurate cu preponderență în zona muchiilor

cărcărilor de mărunțire N_{pm} a deșeurilor solide evacuate natural din interstițiu. Trebuie evidențiat faptul că inegalitatea (6.2) apare totuși în condițiile menționate anterior, când densitatea de curent :

$$j_{\text{med.plăci}} = (1,8 \dots 4,5) \times j_{\text{med.cilindr}} \quad (6.3)$$

ceea ce de fapt micșorează valoarea raportului

$$r_{\text{amf.cilindr}} / r_{\text{amf.plăci}}$$

Influența razei de curbură r_{K2E1} (relația 5.16) asupra creșterii valorii

$r_{\text{amf.cilindr}}$ este redusă și în orice caz este compensată de efectul valorii mai mici a densității de curent j_{med} la electrozi cilindrici (relația 6.3).

În figura 6.7 se prezintă variațiile uzurii relative volumice γ și a razei aproximative la muchii r_{amf} :

$$\gamma = f(L_{Pmax}, d_E, j_{\text{med}}) \quad (6.4)$$

$$r_{\text{amf}} = f(L_{Pmax}, d_E, j_{\text{med}}) \quad (6.5)$$

care evidențiază cu deosebi-

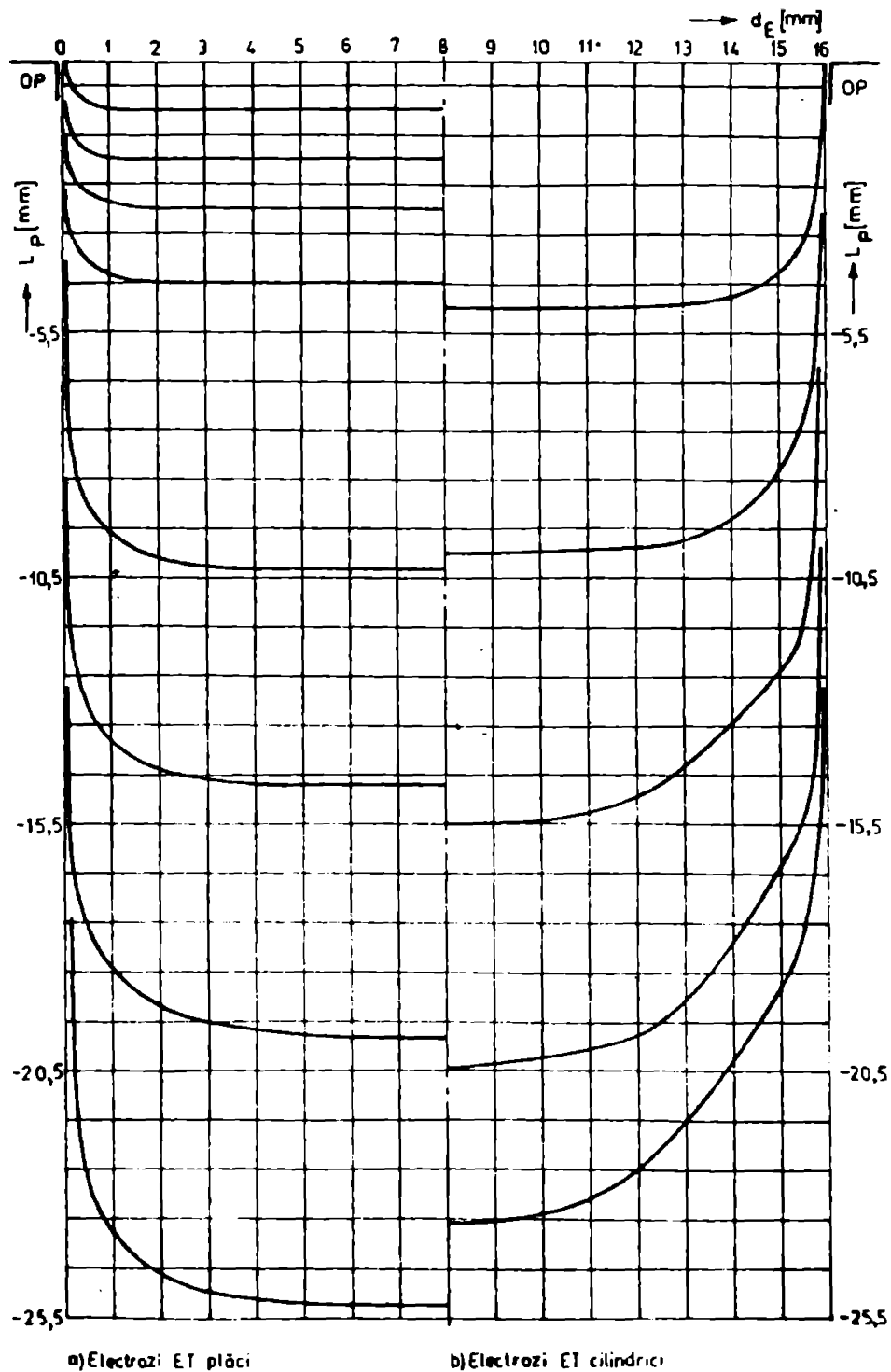


Fig.6.5. Profilurile efective ale electrozilor lățime/diametru $d_E = 16$ mm la diverse adâncimi de prelucrare L_{Pmax} .

electrozilor cilindrici, unde începe traseul vertical de evacuare, determină uzări locale foarte pronunțate, îndeosebi la adâncimi de prelucrare $L_{Pmax} > 10$ mm. Ca un efect al reacției inverse interne a procesului de prelucrare la valori $L_{Pmax} > 5$ mm și $r_{anf} > 2$ mm se ușurează traseul de evacuare a deșeurilor și se constată o reducere generală a valorii uzurii relative volumice γ , în cazul electrozilor cilindrici. În condițiile regimului electric utilizat la prelucrare, la diametre $d_E = 8; 11,3$ mm și adâncimi $L_{Pmax} > 15$ mm

au apărut peliculizări grafitice zonale ale electrozilor cilindrici, ceea ce a dus în continuare la scăderea valorilor uzurii volumice γ . La diametre mai mari $d_E = 16; 20$ mm și adâncimi $L_{Pmax} > 20$ mm, efectul descărcărilor de mărunțire N_{pm} a fost mai important decât cel al pelicularizărilor grafitice zonale, ceea ce a determinat creșteri relative ale uzurii volumice γ .

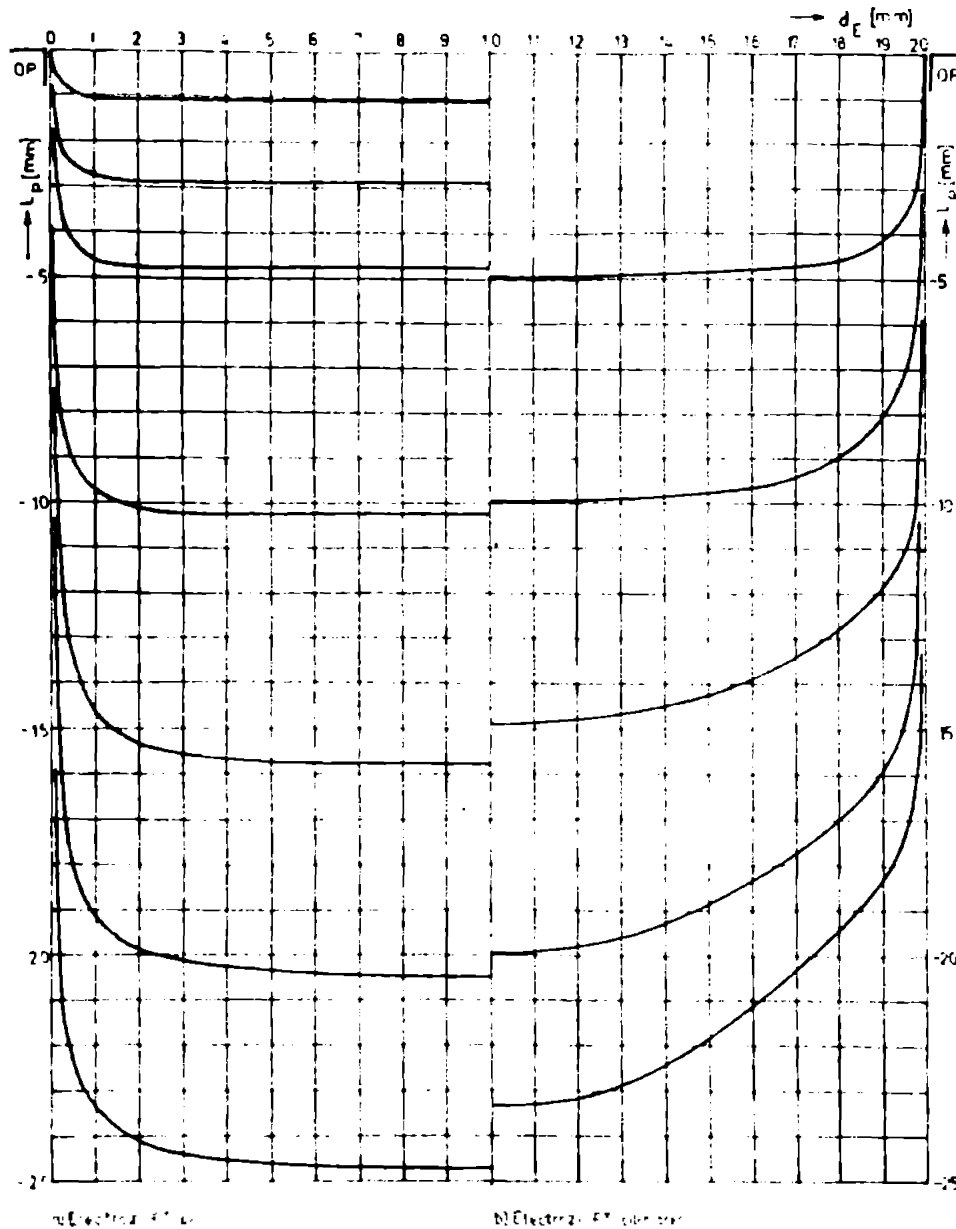


Fig.6.6. Profilurile efective ale electrozilor de lățime/diametru $d_E = 20$ mm la diverse adâncimi de prelucrare L_{Pmax} .

Evoluția în timp a uzurii relative volumice γ și a uzurii liniare minime a electrodului L_{Emin} , paralelă cu axa OZ (fig.6.8):

$$\gamma = f(d_E, j_{med}, t) \quad (6.6)$$

$$L_{Emin} = f(d_E, j_{med}, t) \quad (6.7)$$

evidențiază mai bine influența asupra uzării γ a factorilor

menționați anterior și influența deosebită a valorii densității medii de curent j_{med} (relația 6.3), care este cauza singulară a relației:

$$L_{Emin.plăci} \geq L_{Emin.cilindr.} \quad (6.8)$$

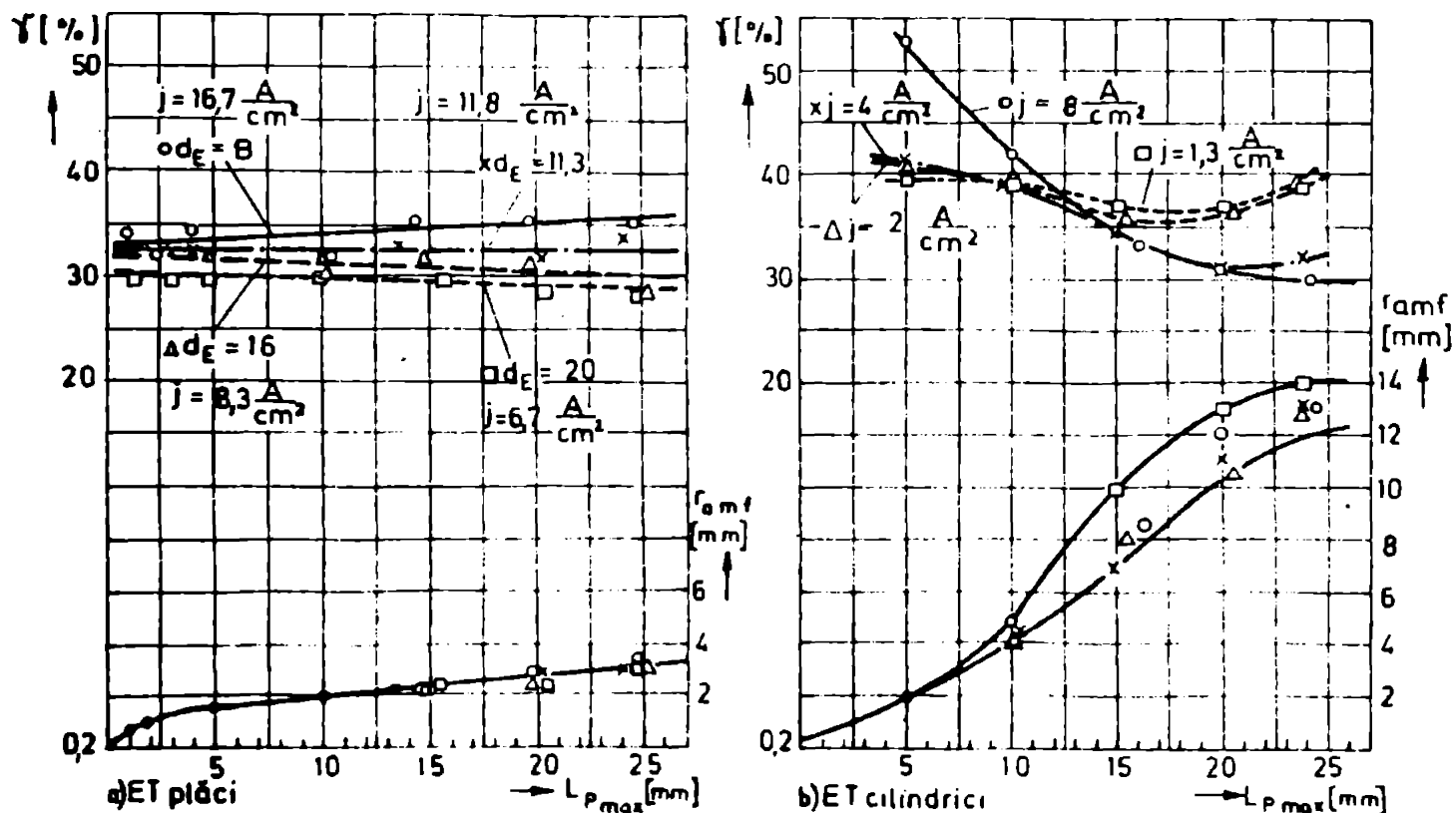


Fig.6.7. Dependentele $\gamma = f(L_{Pmax}, d_E, j_{med})$ și $r_{amf} = f(L_{Pmax}, d_E, j_{med})$ pentru electrozii ET.

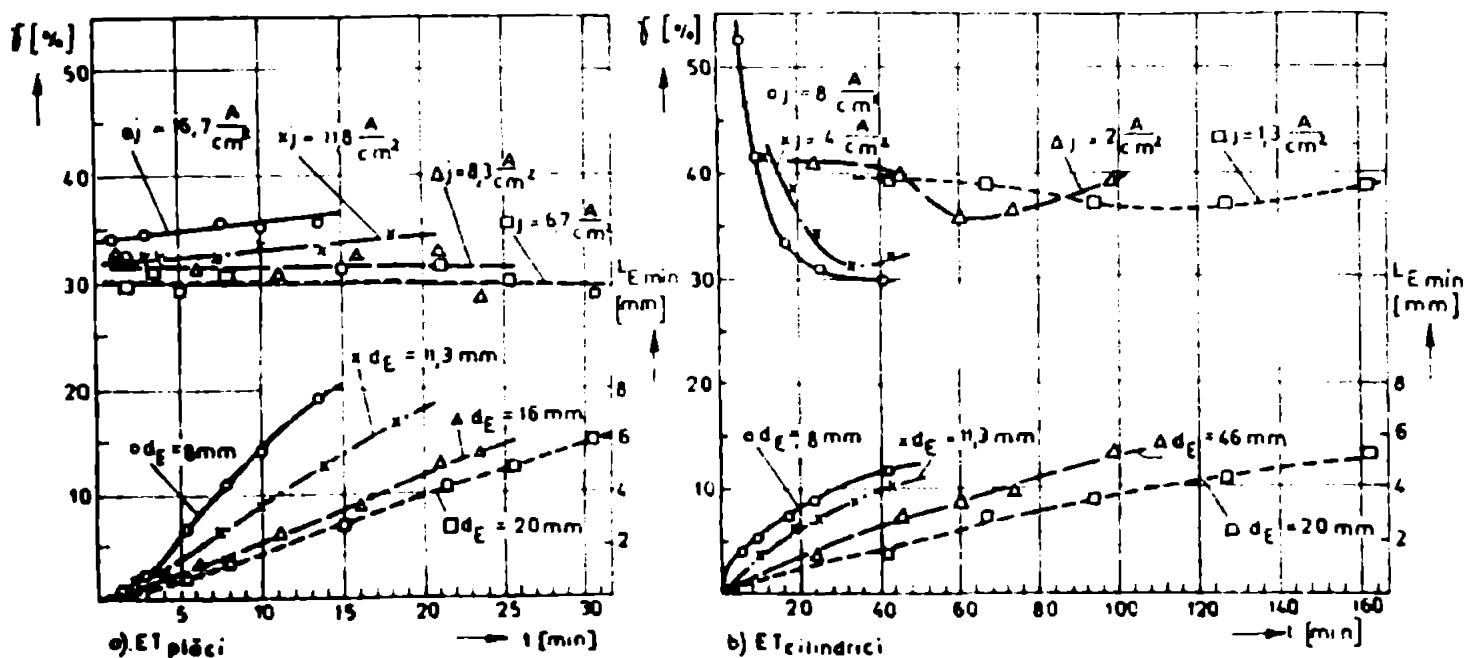


Fig.6.8. Dependentele $\delta = f(d_E, j_{med}, t)$ și $L_{Emin} = f(d_E, j_{med}, t)$ pentru electrozii ET.

Informații mai detaliate despre desfășurarea în timp și spațiu a procesului de uzare a electrodului oferă evoluția valorilor

variabilelor ΔQ_E , L_{Pmax} , v_{Econv} (fig.6.9 și fig.6.10) :

$$\Delta Q_E = f(d_E, j_{med}, t) \quad (6.9)$$

$$L_{Pmax} = f(d_E, j_{med}, t) \quad (6.10)$$

$$v_{Econv} = f(d_E, j_{med}, t) \quad (6.11)$$

$$L_{Econv} = f(d_E, j_{med}, t) \quad (6.12)$$

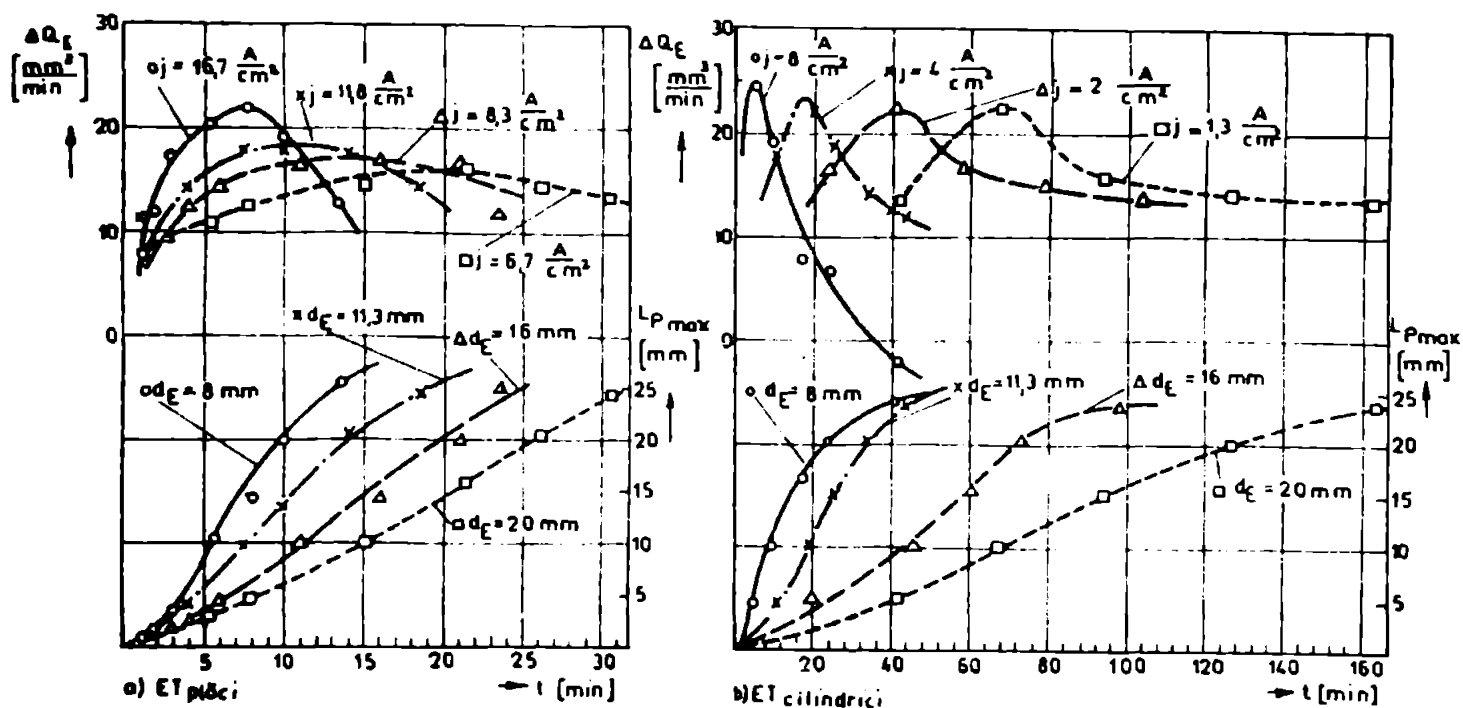


Fig.6.9. Dependentele $\Delta Q_E = f(d_E, j_{med}, t)$ și $L_{Pmax} = f(d_E, j_{med}, t)$ pentru electrozi ET.

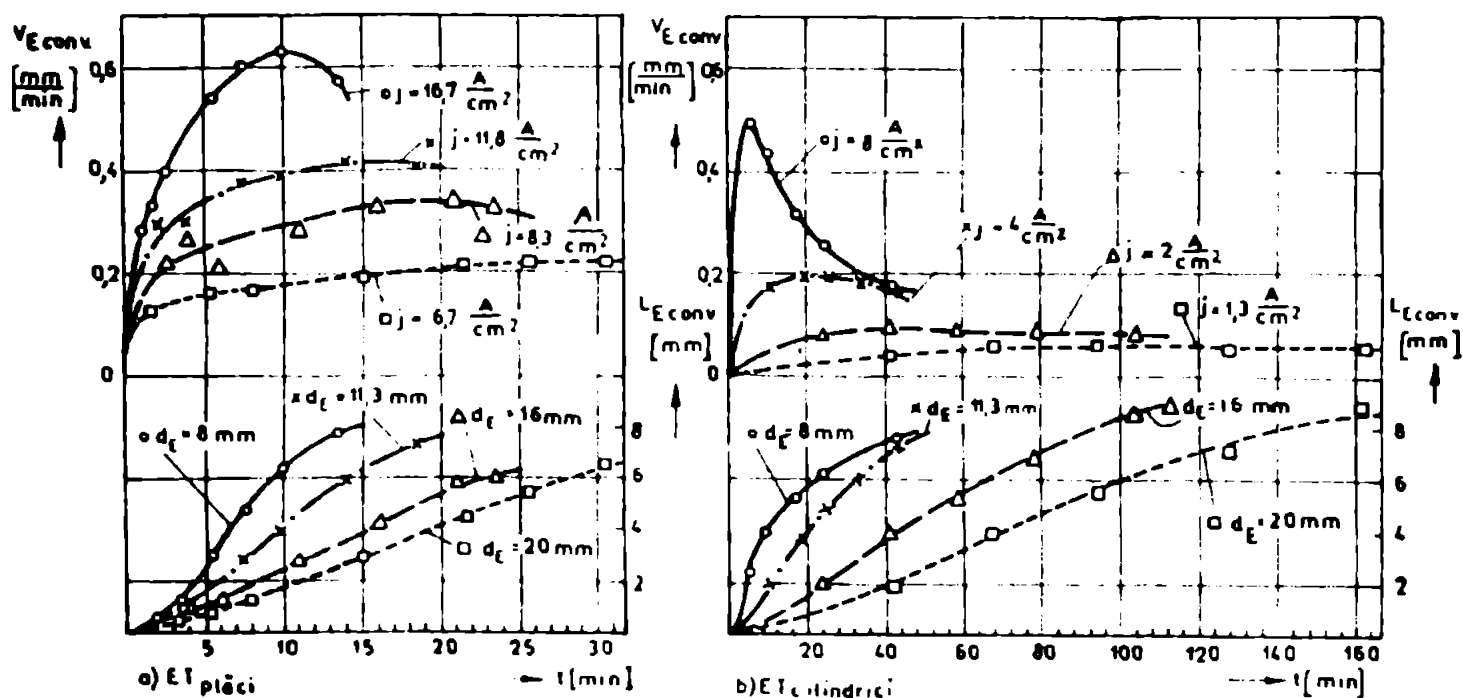


Fig.6.10. Dependentele $v_{Econv} = f(d_E, j_{med}, t)$ și $L_{Econv} = f(d_E, j_{med}, t)$ pentru electrozi ET.

Atît variația de la o adîncime L_{Pmax} la alta a debitării de material ΔQ_E prelevat de la electrozi, cît și viteza convențională de uzare a electrozilor v_{Econv} (relațiile de definiție 5.31 și 5.37 din tabelul 5.3) prezintă maxime distincte în timpul formării razei de rotunjire approximate critice a muchiilor $r_{am.crit}$. La valori $r_{amf} > r_{am.crit}$ începe procesul de reducere relativă a uzării electrozilor, cu tendința de formare a unor profiluri de egală uzură. În cazul electrozilor plăci subțiri razele de rotunjire $r_{am.crit} = (2...2,5)$ mm se formează la adîncimi de prelucrare $L_{Pmax} = (12...20)$ mm, după care procesul de uzare (L_{Econv} în fig.6.10 a, L_{Emin} în figura 6.8 a) se intensifică, cu tendință clară de saturație. În cazul electrozilor cilindrici, deși densitatea de curent este mai mică (relația 6.3), uzura la muchii este mult mărită de descărcările de mărunțire a deșeurilor solide N_{pm} , razele de rotunjire $r_{am.crit} = (4...5)$ mm, formate la adîncimi mai mici $L_{Pmax} = (5...10)$ mm, fiind de 2 ori mai mari ca în cazul electrozilor plăci. Creșterea dificultăților de evacuare naturală a deșeurilor solide în afara interstițiului la $L_{Pmax} > 10$ mm determină uzări locale pronunțate la schimbarea direcției traseului de evacuare, mărind astfel valoarea r_{amf} , cu reduceri simultane a vitezei de prelevare (ΔQ_E în figura 6.9 b, v_{Econv} în fig.6.10 b).

Tendința de formare a unor profiluri de egală uzură apare evidentă la rapoarte L_{Pmax}/d_E de valoare suficient de mare. De exemplu, pentru electrozi de lățime/diametru $d_E = 8$ mm (fig.6.3), profilul de egală uzură în cazul electrozilor cilindrici apare la valori $L_{Pmax}/d_E \geq 3$. Acest fapt este dovedit de variația vitezei longitudinale medii locale de uzare :

$$v_{Elmed} = \frac{\Delta Z_E}{\Delta t} = f(x_E, L_{Pmax}, j_{med}) \quad (6.13)$$

în care: ΔZ_E /mm/ - scurtarea (uzura liniară a) electrodului la abscisa x_E de la o adîncime de prelucrare L_{Pmax} la următoarea ; Δt /min/ - intervalul de timp necesar pentru prelucrarea de la o adîncime L_{Pmax} la următoarea. La electrozii cilindrici (fig.6.3 b) viteza v_{Elmed} are valori și diferențieri mari pînă la formarea razei de rotunjire $r_{am.crit}$ ($L_{Pmax} \cong 5$ mm), iar apoi își reduce relativ valoarea și diferențierea pînă la formarea profilului de egală uzură (la $L_{Pmax} = 25$ mm), cînd :

$$v_{Elmed} = (0,06...0,07) \frac{mm}{min} \cong constant \quad (6.14)$$

6.3.2. Verificarea experimentală a modelului matematic pentru uzarea electrozilor plăci subțiri la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

Verificarea experimentală a modelului matematic compus din relațiile (5.91) și (5.102) nu este deocamdată posibilă, deoarece în cazul prelucrării electroerozive tridimensionale cu copierea formei pe utilaje existente este irealizabilă evacuarea instantanee din interstițiu a deșeurilor solide ale prelucrării. În această situație, verificarea experimentală a modelului se face pentru cazul bidimensional (electrozi plăci subțiri) în planul XOZ /305/ :

$$f_2(X, t + \Delta t) = f_2(X, t) + \Delta Z_E - v_E \cdot \Delta t \quad (6.15)$$

$$\Delta Z_E = \gamma_0 \cdot \Delta Z_P \left(1 \pm \frac{\Delta Z_P \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{K1Ei}} \right) \quad (6.16)$$

în care s-au considerat aceleași notații ca la § 5.5.4.

Așa cum s-a arătat la pagina 106, pe baza modelului matematic compus din relațiile (6.15) și (6.16) este posibilă simularea pe calculatorul electronic numeric a procesului de uzare a electrozilor plăci subțiri, cea mai convenabilă modalitate de simulare folosind o unitate de ieșire cu afișare de tip plotter, care trasează direct profilul electrozilor după fiecare secvență de timp Δt . Corectitudinea și precizia modelului va reieși din compararea profilurilor obținute experimental cu profilurile trasate de plotter. Această simulare pe calculatorul electronic numeric depășește însă tema și spațiul lucrării de față.

O verificare experimentală imediată a preciziei modelului matematic (6.15) și (6.16) este posibilă prin studierea comparativă a uzurii relative liniare λ_z (definită pe direcția de avans OZ) măsurată, respectiv calculată. Din relația (5.101) sau (6.16) se poate scrie pentru cazul electrozilor plăci dreptunghiulare :

$$\lambda_z = \frac{\Delta Z_E}{\Delta Z_P} = \gamma_0 \left(1 + \frac{\Delta Z_P \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{K1Ei}} \right) \quad (6.17)$$

Deoarece profilul de uzare a electrozilor nu este circular (relațiile 6.15 și 6.16) iar pe porțiuni ale muchiilor electrozilor uzați de măsurare razele r_{am} (§ 6.3.1), se poate face verificarea primară a modelului matematic tocmai în aceste zone, pe baza relației analoge cu (6.17) :

$$\lambda_{Zam} = \frac{\Delta Z_{Eam}}{\Delta Z_{Pam}} = \gamma_0 \left(1 + \frac{\Delta Z_{Pam} \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{ami}} \right) \quad (6.18)$$

în care: $\Delta Z_{Eam} = L_{Eamj} - L_{Eam(j-1)}$ /mm/ - uzura liniară locală longitudinală (pe o direcție paralelă cu direcția de avans OZ) a electrodului în decursul unei secvențe j de durată Δt ; $L_{Eam(j-1)}$ /mm/ - uzura liniară locală longitudinală la începutul secvenței Δt ; L_{Eamj} /mm/ - uzura liniară locală longitudinală la sfârșitul secvenței Δt ; ΔZ_{Pam} /mm/ - prelevarea liniară locală longitudinală la obiectul prelucrării, măsurată analog cu ΔZ_{Eam} ; γ_0 - uzura relativă volumică a electrodului în cazul interstițiului plan și al absenței descărcărilor de mărunțire și dispersare; φ_i - unghiul inițial, la începutul secvenței Δt , dintre normala la suprafața electrodului și direcția de avans OZ, la abscisa X_E corespunzătoare uzurii L_{Eam} ; δ /mm/ - grosimea interstițiului geometric dintre electrod și obiectul prelucrării; r_{ami} /mm/ - raza de curbură locală inițială, la începutul secvenței Δt , de valoare egală cu raza aproximată la muchia electrodului, considerată la abscisa X_E corespunzătoare uzurii L_{Eam} .

Prima egalitate din relația (6.18) a fost utilizată la determinarea pe cale experimentală a uzurii relative liniare λ_{Zam} pornind de la măsurătorile efectuate cu comparatorul (pentru avansuri a și grosimi δ ale interstițiului) și proiectorul de profile, iar a doua egalitate din relația (6.18) a permis calculul uzurii λ_{Zamc} pe baza modelului matematic elaborat la § 5.5.4.

Sinteza comparării rezultatelor experimentale (λ_{Zam}) cu cele calculate (λ_{Zamc}), la valori măsurate $\delta = 0,1$ mm; $r_{ami} = 0,2$ mm raza inițială la muchia electrodului; $\varphi_i = 45^\circ$; $\gamma_0 = 0,26$ pentru $j_{med} = 16,7$ A/cm²; $\gamma_0 = 0,24$ pentru $j_{med} = 11,8$ A/cm²; $\gamma_0 = 0,22$ pentru $j_{med} = 8,3$ A/cm²; $\gamma_0 = 0,20$ pentru $j_{med} = 6,7$ A/cm² este dată în tabelul 6.1. Valorile uzurii γ_0 s-au determinat prin măsurări în zonele plane frontale ale electrozilor plăci subțiri, utilizând relația (5.19), fiind ~~coordonate~~ ^{nc} cu valorile din literatură /330, 457/.

Rezultă o bună precizie a modelului matematic (6.18), dovedită de abaterile $\pm 4,5\%$ (tabelul 6.1 coloana 12) respectiv de încadrarea punctelor care verifică modelul într-o bandă verticală îngustă ($X_E = 0,15 \dots 0,58$ mm), în conformitate cu considerentele expuse la § 5.5.4.

Tabelul 6.1.

Sinteza rezultatelor verificării experimentale a preciziei modelului matematic pentru uzarea electrozilor plăci subțiri la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei

Nr. crt.	d_{E1} /mm/	t /min/	L_{Eam} /mm/	L_{Pam} /mm/	ΔZ_{Eam} /mm/	ΔZ_{Pam} /mm/	X_{Eami} /mm/	φ_1°	r_{ami} /mm/	λ_{Zem}	λ_{Zamc}	$\frac{\Delta \lambda_Z}{\lambda_{Zem}}\%$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1,06	0,60	0,63	0,60	0,63	0,15	45	0,2	0,952	0,969	1,8
2		1,75	0,99	1,55	0,39	0,92	0,32	53	0,8	0,424	0,430	1,4
3		3,10	1,65	2,87	0,66	1,32	0,40	49	1,0	0,500	0,511	2,2
4	8	2,66	1,77	3,24	0,12	0,37	0,25	67	1,2	0,324	0,313	-3,4
5		5,50	4,95	8,08	3,18	4,84	0,25	67	1,4	0,657	0,630	-4,1
6		7,70	6,65	12,32	1,70	4,24	0,32	77	2,2	0,401	0,384	-4,5
7		10,00	8,29	17,02	1,64	4,70	0,35	80	2,6	0,349	0,352	0,9
8		13,50	10,03	22,15	1,74	5,13	0,40	80	3,0	0,339	0,346	2,1
9		1,10	0,55	0,68	0,55	0,68	0,15	45	0,2	0,809	0,816	0,9
10		2,15	0,93	1,48	0,38	0,80	0,52	30	0,8	0,475	0,478	0,7
11		3,00	1,31	2,42	0,38	0,94	0,45	52	1,0	0,404	0,403	-0,3
12	11,3	4,00	1,76	3,53	0,45	1,11	0,58	46	1,2	0,405	0,414	2,2
13		7,50	4,44	7,93	2,68	4,40	0,40	58	1,5	0,609	0,629	3,3
14		10,00	5,58	11,31	1,14	3,38	0,48	77	1,8	0,337	0,347	3,0
15		14,00	8,18	17,17	2,60	5,86	0,42	74	2,1	0,444	0,436	-1,8
16		18,50	9,77	21,07	1,59	3,90	0,58	67	2,6	0,408	0,390	-4,4

Tabelul 6.1 - continuare

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17		1,50	0,66	0,74	0,66	0,74	0,15	45	0,2	0,892	0,906	1,7
18		2,75	1,04	1,62	0,38	0,88	0,35	45	0,8	0,432	0,419	-3,0
19		4,00	1,32	2,36	0,28	0,74	0,43	42	1,0	0,378	0,363	-4,0
20	16	6,00	1,92	3,80	0,60	1,44	0,32	52	1,2	0,417	0,401	-3,8
21		11,00	4,27	8,31	2,35	4,51	0,25	65	1,4	0,521	0,535	2,7
22		16,00	5,80	12,31	1,53	4,00	0,30	72	1,8	0,382	0,383	0,3
23		21,00	7,66	17,26	1,86	4,95	0,38	75	2,1	0,376	0,365	-2,9
24		23,50	9,01	21,51	1,35	4,25	0,25	78	2,6	0,310	0,303	-2,3
25		1,75	0,50	0,65	0,50	0,65	0,15	45	0,2	0,769	0,760	-1,2
26		5,25	1,45	2,48	0,95	1,83	0,25	52	0,8	0,519	0,507	-2,3
27		7,82	2,07	4,01	0,62	1,53	0,35	53	1,0	0,405	0,404	-0,2
28	20	15,00	4,33	8,58	2,26	4,57	0,40	64	1,4	0,494	0,500	1,2
29		21,50	6,43	13,52	2,10	4,94	0,45	67	1,8	0,425	0,426	0,2
30		25,50	7,63	17,75	1,20	4,23	0,40	79	2,2	0,284	0,282	-0,7
31		30,50	8,73	21,79	1,10	4,04	0,35	79	2,6	0,272	0,262	-3,4

6.3.3. Concordanța dintre teorie și experiment privind mecanismul uzării electrozilor de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

Rezultatele experimentale prezentate și interpretate la § 6.3.1 și § 6.3.2, atât pentru electrozi plăci subțiri (fig. 6.3 a ... 6.10 a) cât și pentru electrozi cilindrici (fig. 6.3 b ... 6.10 b) confirmă întrutotul corectitudinea explicației teoretice a mecanismului de uzare a electrodului elaborată la § 5.3.1, § 5.5.4 și sintetizată în concluziile de la pagina 81.

În plus față de acestea, variația vitezelor longitudinale medii locale de uzare v_{Elmed} (fig. 6.3 a) confirmă experimental corectitudinea explicației teoretice dată de modelul matematic (6.15), (6.16) respectiv (6.18), privind modul de propagare a uzurii de la muchii spre suprafețele plane sau de curburi mai mici ale electrozilor plăci subțiri. Din (6.16) rezultă că în zona muchiei rotunjite :

$$\Delta Z_{Em} = \gamma_0 \cdot \Delta Z_p \left(1 + \frac{\Delta Z_p \cdot \cos \varphi_i + \delta}{r_{KLEi}} \right) \quad (6.19)$$

iar în zona plană a electrodului ($r_{KLEi} = \infty$) :

$$\Delta Z_{Ep} = \gamma_0 \cdot \Delta Z_p \quad (6.20)$$

Deci, întotdeauna la curburi pozitive, într-o parte și în cealaltă (fig. 6.11) a liniei r de racord între suprafața frontală plană

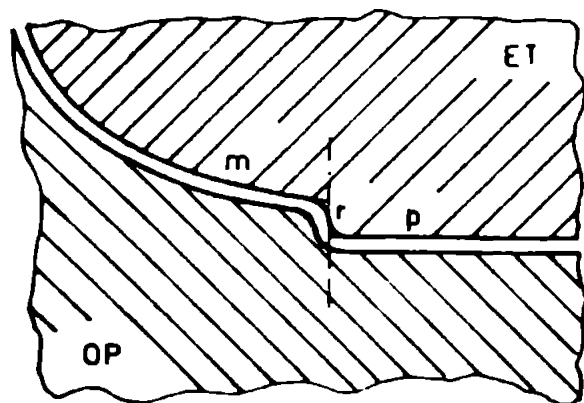


Fig. 6.11. Principiul propagării uzurii de la muchii (m) spre suprafețe plane (p) sau de curburi mai mici ale electrozilor plăci subțiri.

și suprafața cilindrică a muchiei rotunjite există relația :

$$\Delta Z_{Em} > \Delta Z_{Ep} \quad (6.21)$$

ceea ce indică prezența unei discontinuități generatoare de uzuri mai mari înspre suprafața plană frontală a electrodului, unde curbura este pozitivă și maximă.

Această concluzie teoretică este foarte bine confirmată experimental de variația vitezelor v_{Elmed} la adâncimile de prelucrare

$L_{Pmax} = 4; 14,6$ mm (fig. 6.3 a

punctele p, în care apare curbura pozitivă maximă).

Tot variația vitezelor locale de uzare v_{Elmed} (fig. 6.3)

arată clar că în general, în punctele unde apar la un moment dat raze de curbură minime uzura electrodului ET este mai pronunțată, ceea ce determină o evoluție practic continuă a suprafeței (profilului) active a ET, deși la aceeași abscisă X_E variabilele procesului prezintă valori oscilante, ca expresie a modificărilor periodice a razelor de curbură locale.

Corectitudinea explicației teoretice a mecanismului de uzare a electrodului sintetizată în concluziile de la pagina 81 este confirmată, deasemeni, și de rezultatele experimentale ale cercetărilor privind influența evacuării forțate a deșeurilor în afara interstițiului /115,186,314/.

Cercetările menționate demonstrează că, din cauza perturbărilor proceselor de evacuare a deșeurilor sau a proceselor de peliculizare a electrozilor ET, uzura ET este accentuată suplimentar tocmai în zonele unde factorii geometrici (raze mici de curbură etc.) cauzează uzură preponderentă, în conformitate cu modelul matematic (5.91), (5.102).

7. Influența uzurii electrodului de transfer asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.

7.1. Influența uzurii electrodului asupra caracteristicilor tehnologice ale prelucrării.

Caracteristicile tehnologice sînt de fapt variabile de performanță ale proceselor de transformare (vezi fig.2.2 și § 3.1.1) ce definesc cantitativ modificările proprietăților fizico-chimice ale elementelor spațiului de lucru și precizia acestor modificări față de valorile impuse de documentația tehnică.

La prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei uzura electrodului de transfer ET este o caracteristică tehnologică deosebit de importantă, dată fiind metoda de generare prin copiere a suprafeței piesei. Creșterea uzurii ET are în principal următoarele influențe asupra celorlalte caracteristici tehnologice: reducerea complexității analitice a suprafeței geometrice reale a piesei prelucrate față de cea prescrisă și reducerea preciziei prelucrării dimensionale a suprafeței reale a piesei.

În practica industrială, la proiectarea tehnologiei și la prelucrarea propriu-zisă trebuie cunoscuți factorii (variabilele)

care determină precizia dimensională a prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei. La fel ca la orice al procedeu și proces de prelucrare dimensională, și la prelucrarea electroerozivă determinarea pe cale analitică a erorii totale de prelucrare, funcție de influența tuturor factorilor, prezintă o importanță deosebită.

Eroarea totală de prelucrare în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei poate fi determinată cu diverse grupări ale variabilelor (după caracterul influenței; după dependența de sistemul de acțiune tehnologică la nivel de operație SATO etc. /77, 292, 315/) :

$$\begin{aligned} \vec{e}_{\text{tot}} &= \vec{e}_{\text{sist}} + \vec{e}_{\text{int}} = \vec{e}_{\text{ind}} + \vec{e}_{\text{dep}} = \\ &= \vec{e}_{\text{ind}} + \vec{e}_{\text{str}} + \vec{e}_{\text{pro}} \quad / \text{mm} / \quad (7.1) \end{aligned}$$

în care: \vec{e}_{sist} - erori cauzate de factori cu caracter sistematic; \vec{e}_{int} - erori cauzate de factori întâmplători; \vec{e}_{ind} - erori independente de SATO; \vec{e}_{dep} - erori dependente de SATO; \vec{e}_{str} - erori dependente de structura SATO; \vec{e}_{pro} - erori dependente de procesele SATO.

Cele trei mari grupe de erori prezintă o structură și o determinare complexă /164, 213, 314/. Astfel, erorile independente de SATO \vec{e}_{ind} pot fi teoretice (adoptarea conștientă a unor aproximații la prelucrarea prin copierea formei cu mișcare orbitală a electrodului) sau cauzate de obiectul prelucrării OP (erori geometrice de fabricare a OP, variația locală a caracteristicilor fizico-chimice ale materialului OP, variația adaosului de prelucrare); erorile dependente de structura SATO \vec{e}_{str} pot fi cauzate de erorile geometrice ale mașinii (aparaturii) de prelucrare, echipamentelor și dispozitivelor (atât erorile inițiale cât și cele datorate uzurii de funcționare) sau pot fi purtate de însăși electrodul ET (erori geometrice de fabricare a ET, variația locală a caracteristicilor fizico-chimice ale materialului ET); erorile dependente de procesele din sistemul tehnologic SATO au în principiu componența:

$$\vec{e}_{\text{pro}} = \vec{e}_{\text{inst}} + \vec{e}_{\text{uzET}} + \vec{e}_{\delta} + \vec{e}_{\text{def}} + \vec{e}_{\text{vibr}} \quad (7.2)$$

în care: \vec{e}_{inst} - erorile de instalare ale OP și ET (de așezare și rezemare, de fixare, de reglare a poziției între ET-OP și a opritorilor pentru adâncimea de prelucrare) ; \vec{e}_{uzET} - erorile macrogeometrice cauzate de uzura electrodului ET; \vec{e}_{δ} - erorile cauzate de neuniformitatea grosimii δ a interstițiului; \vec{e}_{def} - erorile cauzate de deformările ET și OP în decursul prelucrării (termice și,

foarte rar, elastice); \vec{e}_{vibr} - erorile cauzate de vibrații (îndeosebi de vibrațiile transversale ale ET).

Literatura de specialitate menționată anterior a studiat satisfăcător erorile componente ale erorii totale, cu excepția erorilor macrogeometrice cauzate de uzura electrodului. Această situație este explicată de rămânerea în urmă a modelării matematice a uzării electrodului ET. De aceea cercetările de la capitolele 5 și 6 au fost orientate spre apropierea de determinarea analitică a erorilor macrogeometrice cauzate de uzura ET la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

Așa cum rezultă implicit din cercetările efectuate la § 5.3.2, § 5.5.4 și cum au demonstrat cercetările experimentale efectuate de Kamsiuk /166/, uzura locală h_{En} a electrodului și prelevarea locală h_{Pn} a obiectului prelucrării (considerate pe direcția normalei la suprafețele în interacțiune) în cazul interstițiului cvasiparalel sînt proporționale cu densitatea locală de curent j :

$$h_{En} = c_E \cdot j \cdot \Delta t \quad (7.3)$$

$$h_{Pn} = c_P \cdot j \cdot \Delta t \quad (7.4)$$

în care: c_E, c_P - coeficienți de proporționalitate.

Conform figurii 5.7, avansul pe direcția normalei la suprafețele considerate este :

$$h_n = h_{En} + h_{Pn} = (c_E + c_P) \cdot j \cdot \Delta t \quad (7.5)$$

Din (7.4), (7.5) și (5.95) rezultă :

$$h_{Pn} = \frac{c_P \cdot h_n}{(c_E + c_P)} = \frac{h_n}{1 + \lambda_n} \quad (7.6)$$

ceea ce, pe baza (5.100) și (5.101) se mai scrie :

$$\Delta Z_P = \frac{\Delta Z}{1 + \lambda_Z} \quad (7.7)$$

în care $\Delta Z = \Delta Z_P + \Delta Z_E$ este avansul electrodului în secvența de timp Δt .

Pentru o durată de timp extinsă t_d se poate defini (relația 5.43 din tabelul 5.3) :

$$\lambda_L = \frac{L_E}{L_P} \quad (7.8)$$

respectiv se obține pentru cazul interstițiului cvasiparalel :

$$L_P = \frac{L_P + L_E}{1 + \lambda_L} = \frac{a}{1 + \lambda_L} \quad (7.9)$$

Deoarece $\Delta Z_P = \Delta Z - \Delta Z_E$ și $L_P = a - L_E$, din (7.7) și (7.9) rezultă:

$$\Delta Z_E = \frac{\Delta Z \cdot \lambda_Z}{1 + \lambda_Z} \quad (7.10)$$

$$L_E = \frac{a \cdot \lambda_L}{1 + \lambda_L} \quad (7.11)$$

în care: a - avansul longitudinal (paralel cu direcția axei OZ) al electrodului în timpul t_a .

Tinând seama de (5.92) se demonstrează fără dificultate că (7.10) devine (5.99), sau că, înlocuind (6.17) în (7.10) se obține (6.16). De fapt, pentru determinarea analitică directă a erorii \vec{e}_{uzET} , relația (7.10) este inutilizabilă. Dar, pe direcția de avans OZ, la interstițiu cvasiparalel :

$$\left| \vec{e}_{uzET} \right|_a = L_{Ea} = \frac{a \cdot \lambda_L}{1 + \lambda_L} \quad (7.12)$$

În cazul cînd interstițiul nu este cvasiparalel de la începutul prelucrării (de exemplu în figura 7.1 cînd suprafața inițială activă a obiectului prelucrat OP este plană iar cea a electrodului ET este o formă oarecare), numai unele puncte sau zone ale suprafeței active a ET participă pe întreaga durată t_a la procesele de prelucrare din spațiul de lucru SL. Pentru celelalte puncte participarea la procesele din SL este de durată $t_p < t_a$ și corespunzător se poate scrie, în cazul considerat (fig.7.1 b) :

$$a = L_{Pmax} + L_{Emax} = g + L_P + L_{Ep} = g + p \quad (7.13)$$

în care: p - avansul activ longitudinal local al electrodului în timpul t_p .

Atunci, relația (7.11) pe direcția de avans devine :

$$\left| \vec{e}_{uzET} \right|_p = L_{Ep} = \frac{p \cdot \lambda_L}{1 + \lambda_L} \quad (7.14)$$

În condiții identice de proces este evident valabil :

$$\left| \vec{e}_{uzET} \right|_p < \left| \vec{e}_{uzET} \right|_a \quad (7.15)$$

In cazul general, indiferent dacă interstițiul este sau nu cvasiparalel, uzura relativă liniară locală λ_L este o funcție de mai multe variabile decât funcția (5.101) :

$$\lambda_L = f(\delta_0, L_P, X_E, r_{K1Ei}, r_{K2Ei}, r_{K1Pi}, r_{K2Pi}, \varphi_i, \delta, v_{LL}) \quad (7.16)$$

în care semnificațiile variabilelor sînt aceleași cu cele din subcapitolul 5.4, în afară de: r_{KPi} - razele de curbură locale inițiale ale OP, în planul de avans (indice 1) și într-un plan perpendicular pe planul de avans (indicele 2); v_{LL} - viteza locală de curgere a lichidului de lucru în interstițiul ET-OP.

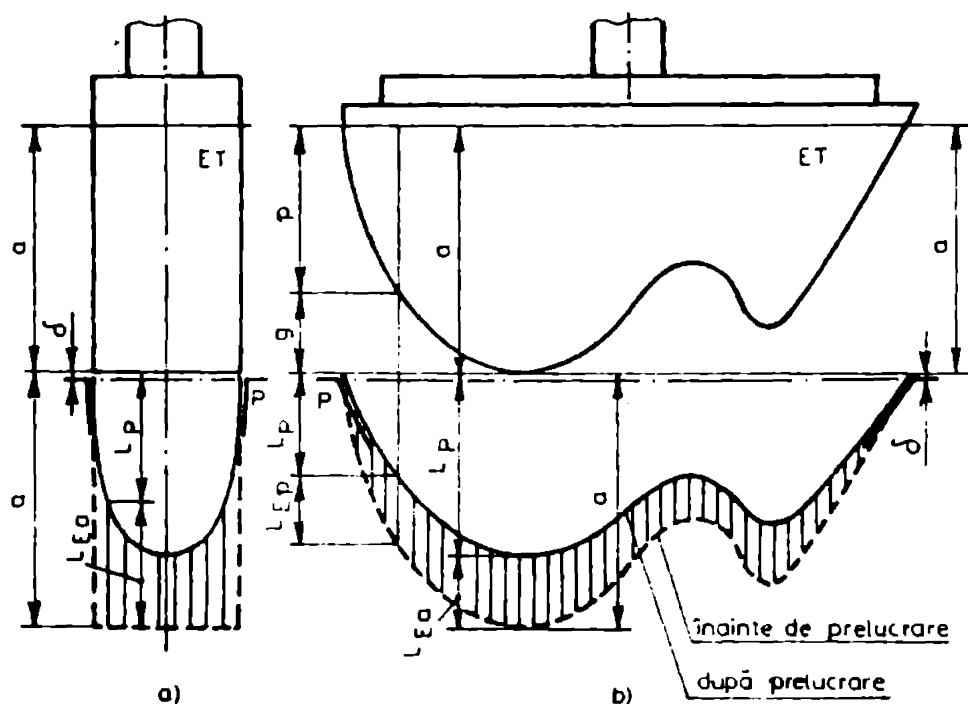


Fig.7.1. Erorile macrogeometrice cauzate la piesa P de către uzura electrodului ET: a) interstițiu cvasiparalel de la începutul prelucrării; b) interstițiu neparalel la începutul prelucrării.

Considerînd valorile $\lambda_L = 0,0001 \dots 1$, din (7.12) și (7.14) rezultă respectiv :

$$L_{Ea} = (0,000099 \dots 0,5) \cdot a \quad (7.17)$$

$$L_{Ep} = (0,000099 \dots 0,5) \cdot p \quad (7.18)$$

În tabelul 7.1 se reprezintă grafic relația (7.17) sau (7.18).

Deci, eroarea macrogeometrică \vec{e}_{uzET} cauzată la piesa prelucrată de către uzura electrodului ET este cu atît mai mare cu cît este mai mare uzura relativă liniară locală și adîncimea locală a cavității prelucrate prin eroziune electrică cu copierea formei. Așa cum s-a arătat în capitolul 5, complexitatea deosebită a procesului de generare a suprafeței la prelucrarea electroerozivă cu

Tabelul 7.1.
Dependența erorilor macrogeometrice e_{uzET} de uzura relativă liniară λ_L a
electrodului și de avansul activ a sa p .

λ_L a, p	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	0,020	0,048	0,091	0,167	0,231	0,286	0,333	0,375	0,412	0,444	0,474	0,500
2	0,040	0,096	0,182	0,334	0,462	0,572	0,666	0,750	0,824	0,888	0,984	1,000
3	0,060	0,144	0,273	0,501	0,693	0,858	0,999	1,125	1,236	1,332	1,422	1,500
4	0,080	0,192	0,364	0,668	0,924	1,144	1,332	1,500	1,648	1,776	1,896	2,000
6	0,120	0,288	0,546	1,002	1,386	1,716	1,998	2,250	2,472	2,664	2,844	3,000
8	0,160	0,384	0,728	1,356	1,848	2,288	2,664	3,000	3,296	3,552	3,792	4,000
10	0,200	0,480	0,910	1,670	2,310	2,860	3,330	3,750	4,120	4,440	4,740	5,000
12	0,240	0,576	1,092	2,004	2,772	3,432	3,996	4,500	4,944	5,328	5,688	6,000
14	0,280	0,672	1,274	2,338	3,234	4,004	4,662	5,250	5,768	6,216	6,636	7,000
16	0,320	0,768	1,456	2,672	3,696	4,576	5,328	6,000	6,592	7,104	7,587	8,000
18	0,360	0,864	1,638	3,006	4,158	5,148	5,994	6,750	7,416	7,992	8,532	9,000
20	0,400	0,960	1,820	3,340	4,620	5,720	6,660	7,500	8,240	8,880	9,480	10,000
22	0,440	1,056	2,002	3,674	5,082	6,292	7,326	8,250	9,064	9,768	10,428	11,000
24	0,480	1,152	2,184	4,008	5,544	6,864	7,992	9,000	9,888	10,656	11,376	12,000
26	0,520	1,248	2,366	4,342	6,006	7,436	8,658	9,750	10,712	11,544	12,324	13,000
28	0,560	1,344	2,548	4,676	6,468	8,008	9,324	10,500	11,536	12,432	13,272	14,000
30	0,600	1,440	2,730	5,010	6,930	8,580	9,990	11,250	12,360	13,320	14,220	15,000
32	0,640	1,536	2,912	5,344	7,392	9,152	10,656	12,000	13,184	14,208	15,168	16,000
34	0,680	1,632	3,094	5,678	7,854	9,724	11,322	12,750	14,008	15,096	16,116	17,000
36	0,720	1,728	3,276	6,012	8,316	10,295	11,988	13,500	14,832	15,984	17,064	18,000
38	0,760	1,824	3,458	6,346	8,778	10,868	12,654	14,250	15,656	16,872	18,012	19,000
40	0,800	1,920	3,640	6,680	9,240	11,440	13,320	15,000	16,480	17,760	18,960	20,000
42	0,840	2,016	3,822	7,014	9,702	12,012	13,986	15,750	17,304	18,648	19,908	21,000
44	0,880	2,112	4,004	7,348	10,164	12,584	14,652	16,500	18,128	19,536	20,856	22,000
46	0,920	2,208	4,186	7,682	10,626	13,156	15,318	17,250	18,952	20,424	21,804	23,000
48	0,960	2,304	4,368	8,016	11,088	13,728	15,984	18,000	19,776	21,312	22,752	24,000
50	1,000	2,400	4,550	8,350	11,550	14,300	16,650	18,750	20,600	22,200	23,700	25,000

copierea formei impune ca determinarea analitică a valorilor e_{uzET} să se facă pe baza simulării procesului pe calculatorul electronic numeric.

7.2. Influența uzurii electrodului asupra caracteristicilor economice ale prelucrării.

Caracteristicile economice ale prelucrării (fig.2.2) se referă la productivitate, cost, eficiență economică. Creșterea uzurii electrodului ET are ca influență reducerea productivității relative volumice ψ a prelucrării (tabelul 5.3, relația 5.35), a eficienței economice, respectiv mărirea costului prelucrării.

Costul producției unui lot de n_E electrozi în cadrul secțiilor întreprinderii (secției sculărie) se poate calcula /301,310/ fie pe articole de calculație :

$$C_{nE} = n_E \cdot C_E = n_E \left\{ \sum_{s=1}^n [C_{mE} - C_{deșE} + C_{rdE}(1+R_s)]_s + \frac{C_{SDVE}}{n_E} \right\} / \frac{\text{lei}}{\text{lot}} / \quad (7.19)$$

fie cu ajutorul taxei-oră-mașină sau valorii medii a orei-secție :

$$C_{nE} = n_E \cdot C_E = n_E \left(\sum_{k=1}^q T_{hmK} \cdot N_{TKE} + C_{mE} + \frac{C_{SDVE}}{n_E} \right) / \frac{\text{lei}}{\text{lot}} / \quad (7.20)$$

$$C_{nE} = n_E \cdot C_E = n_E \left(V_{mhs} \cdot \sum_{k=1}^q N_{TKE} + C_{mE} + \frac{C_{SDVE}}{n_E} \right) / \frac{\text{lei}}{\text{lot}} / \quad (7.21)$$

în care: C_E (lei/buc) - costul unui electrod; C_{mE} - costul cu materialele directe necesare fabricării unui electrod; $C_{deșE}$ (lei/buc) - contravaloarea deșeurilor recuperabile; C_{rdE} (lei/buc) - costul cu retribuiția directă în secția s; R_s - regia secției s; $s = 1 \dots n$ - secțiile în care se fabrică electrodul ET; C_{SDVE} (lei/lot) - costul SDV-urilor speciale eventual necesare fabricării ET (modele, matrițe etc.); $k = 1 \dots q$ - operațiile de fabricare ale ET; T_{hmK} (lei/oră) - taxa-oră-mașină pentru operația k; N_{TKE} (oră/buc) - norma de timp pentru operația k; V_{mhs} (lei/oră) - valoarea medie a orei-secție sculărie pentru operații de fabricare.

În general mărimea lotului n_E este dată de relația :

$$n_E = n_P \cdot n_C \cdot n_{ET} / \frac{\text{buc}}{\text{lot}} / \quad (7.22)$$

în care: n_P (buc/lot) - numărul de piese P ce se prelucurează într-un lot; n_C (cav/buc) - numărul de cavități sau orificii de același tip ce trebuie prelucrate prin eroziune electrică cu copierea

formeii la o singură piesă P; n_{ET} (buc/cav) - numărul de electrozi ET necesari pentru prelucrarea electroerozivă a unei cavități (în cazul prelucrării unui orificiu $n_{ET} = 1$, dar se mărește corespunzător lungimea părții active a ET).

Uzura electrodului ET și precizia impusă prelucrării electroerozive determină valoarea mărimii n_{ET} . În literatura de specialitate /162, 213, 314, 364/ se propun diverse modalități de calcul a mărimii n_{ET} . În principiu /364/ apar două cazuri de electrozi corijați:

a). Pentru prelucrarea la precizia impusă a unei cavități sînt necesari mai mulți electrozi n_{ET} , dacă abaterea relativă a_P determinată de uzura locală a ET este mai mică decît uzura relativă liniară λ_L :

$$a_P = \frac{0,3 \cdot T_{dP}}{L_P} < \lambda_L ; \quad n_{ET} = \frac{\lg a_P}{\lg \frac{\lambda_L}{1 + \lambda_L}} \geq 1 \quad (7.23)$$

în care: T_{dP} /mm/ - toleranța dimensională impusă la prelucrarea piesei P, în punctul analizat; L_P /mm/ - adîncimea cavității în piesa P, în punctul analizat; λ_L - uzura relativă liniară în punctul analizat.

b). Dacă nu există puncte pentru care $a_P < \lambda_L$ apare situația inversă, cînd cu un singur electrod ET se pot prelucra, la precizia impusă, mai multe cavități (piese) $n_P \cdot n_C$:

$$a_P > \lambda_L ; \quad n_P \cdot n_C = \frac{\lg(1 - a_P)}{\lg(1 + \lambda_L)} > 1 \quad (7.24)$$

Conform relației (7.22) rezultă în acest caz:

$$n_{ET} = \frac{1}{n_P \cdot n_C} = \frac{\lg(1 + \lambda_L)}{\lg(1 - a_P)} < 1 \quad (7.25)$$

Relațiile (7.23) și (7.24) sînt reprezentate în figura 7.2, putînd fi utilizate în practica proiectării tehnologice prelucrării electroerozive cu copierea formeii.

Costul prelucrării prin eroziune electrică a unei piese P se poate calcula pe articole de calculație cu relația de genul (7.19):

$$C_{pP} = C_{rdP}(1 + R_s) + \frac{C_{nE}}{n_P} \quad / \frac{\text{lei}}{\text{buc}} / \quad (7.26)$$

iar costul prelucrării unei cavități este:

$$C_{pc} = \frac{C_{pP}}{n_c} = \frac{N_{TP} \cdot T_P (1 + i)(1 + R_s)}{n_c} + \frac{C_{nE}}{n_P \cdot n_c} / \frac{\text{lei}}{\text{cav}} \quad (7.27)$$

în care: C_{rdP} (lei/buc) - costul cu retribuiția directă pentru prelucrarea prin eroziune electrică a P; N_{TP} (ore/buc) - norma de timp pentru operația de prelucrare electroerozivă a P, care în cazul general se poate determina cu produsul $N_{TP} = n_c \cdot N_{Tc}$; N_{Tc} (ore/cav) - norma de timp pentru prelucrarea prin eroziune electrică a unei cavități P; T_P (lei/oră) - tariful orar al categoriei de calificare pentru prelucrarea prin eroziune electrică a P; $i = 0,16$ - coeficient pentru impozitul pe fondul de retribuiție; R_s - regia secției (în general regia secției sculărie).

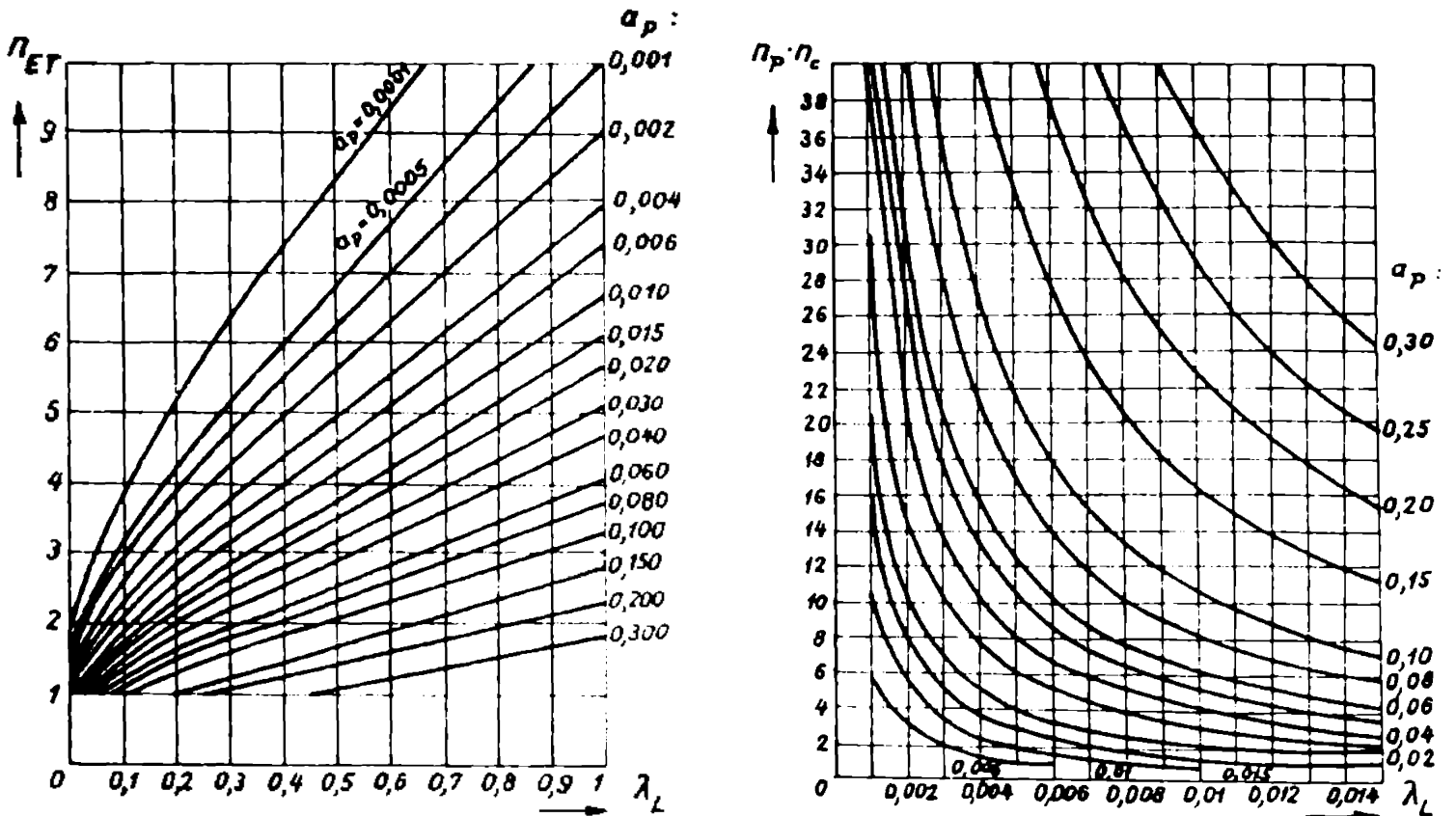


Fig.7.2. Numărul de electrozi n_{ET} necesari la prelucrarea unei cavități (a) sau numărul de cavități $n_P \cdot n_c$ ce se pot prelucra cu un electrod (b), funcție de valoarea uzurii relative liniare λ_L .

Tinând seama de (7.21) și de faptul că obișnuit $T_P = 12$ lei/oră, $V_{mhs} = 35$ lei/oră, $R_s = 200 \%$, relația (7.27) devine :

$$C_{pc} = 41,5 \cdot \frac{N_{TP}}{n_c} + n_{ET} (35 \sum_{k=1}^q N_{TKE} + C_{mE}) + \frac{C_{SDVE}}{n_P \cdot n_c} = C_{pec} + C_{Ec} / \frac{\text{lei}}{\text{cav}} \quad (7.28)$$

în care: $C_{pee} = 41,5 \cdot N_{TP} / n_c$ - costul desfășurării procesului de prelucrare electroerozivă cu copierea formei a unei cavități;
 C_{Ec} - costul cu electrozii ET ce revine pentru o cavitate prelucrată electroeroziv.

Relația (7.23) împreună cu relațiile (7.23) și (7.25) sau figura 7.2 arată că ponderea costului cu electrozii C_{Ec} în costul prelucrării electroerozive a unei cavități este cu atât mai mare cu cât uzura relativă liniară λ_L este mai mare, respectiv cu cât abateres relativă a_p , impusă la prelucrarea piesei F, este mai mică. Această pondere crește deasemeni, cu mărirea costului cu materialele pentru electrozi, a duratei fabricării ET și a cotei pentru SDV-uri speciale necesare fabricării ET.

Rezultă evident că reducerea costului cu electrozii C_{Ec} este posibilă numai prin selecția optimă a materialelor și a procedeelor de fabricare a electrozilor de transfer.

III. STUDII SI CERCETARI PRIVIND FABRICAREA
ELECTROZIIOR DE TRANSFER PENTRU PRELUCRAREA
PRIN EROZIUNE ELECTRICA CU COPIEREA FORMEI

8. Studiul procedeelor de fabricare a electrozilor
de transfer pentru prelucrarea prin eroziune
electrică cu copierea formei.

În ultimele trei decenii fabricația electrozilor prin prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei s-a caracterizat printr-o deosebită diversificare a materialelor și procedeelor. Această diversificare a urmărit întotdeauna, în esență, realizarea unei calități totale optime pentru produsul electrod, adică (subcapitolul 4.3), un nivel al performanțelor tehnice de calitate în conformitate cu cerințele fundamentale impuse electrodului, realizate cu costuri minime și eficiență economică maximă.

Dată fiind mulțimea de materiale și procedee existente, fabricarea electrozilor de transfer ridică în prezent două probleme importante :

1) stabilirea domeniului optim de aplicare a materialelor și procedeelor de fabricare a electrozilor, în funcție de diverse criterii ;

2) identificarea și dezvoltarea acelor procedee de fabricare ce asigură costuri reduse C_{Ec} cu electrozii necesari prelucrării unei cavități, orificiu etc.

8.1. Domeniile aplicării optime a procedeelor
de fabricare a electrozilor de transfer.

Domeniul aplicării optime a unui proces tehnologic de fabricare se stabilește obișnuit (fig.8.1) după proiectarea pe variante j a proceselor (succesiunea rațională a operațiilor, alegerea utilajelor și echipamentelor tehnologice, stabilirea regimurilor optime de lucru etc.), calculul unor indicatori de eficiență și, pe baza acestora, calculul mărimii critice a seriei de fabricare.

Indicatorii de bază ai eficienței economice a unei tehnologii sînt determinați /301, 310/ de nivelul investițiilor necesare pentru tehnica nouă și de costurile corespunzătoare tehnologiei respective, putînd fi: a) cheltuieli recalculat K_{tn} pentru tehnica nouă, cînd investiția pentru tehnica nouă prezintă valori sensibil diferite pentru cele două variante de tehnologii comparate ;

b) costul complet comercial C_{cc} sau costul de secție C_s , cînd o tehnologie nouă necesită modificări importante ale proceselor, sau cînd se compară procese desfășurate în secții diferite; c) costul tehnologic C_t , cînd nu sînt necesare modificări importante ale proceselor, sau cînd utilajele necesare pentru tehnologiile comparate există în dotarea secției.

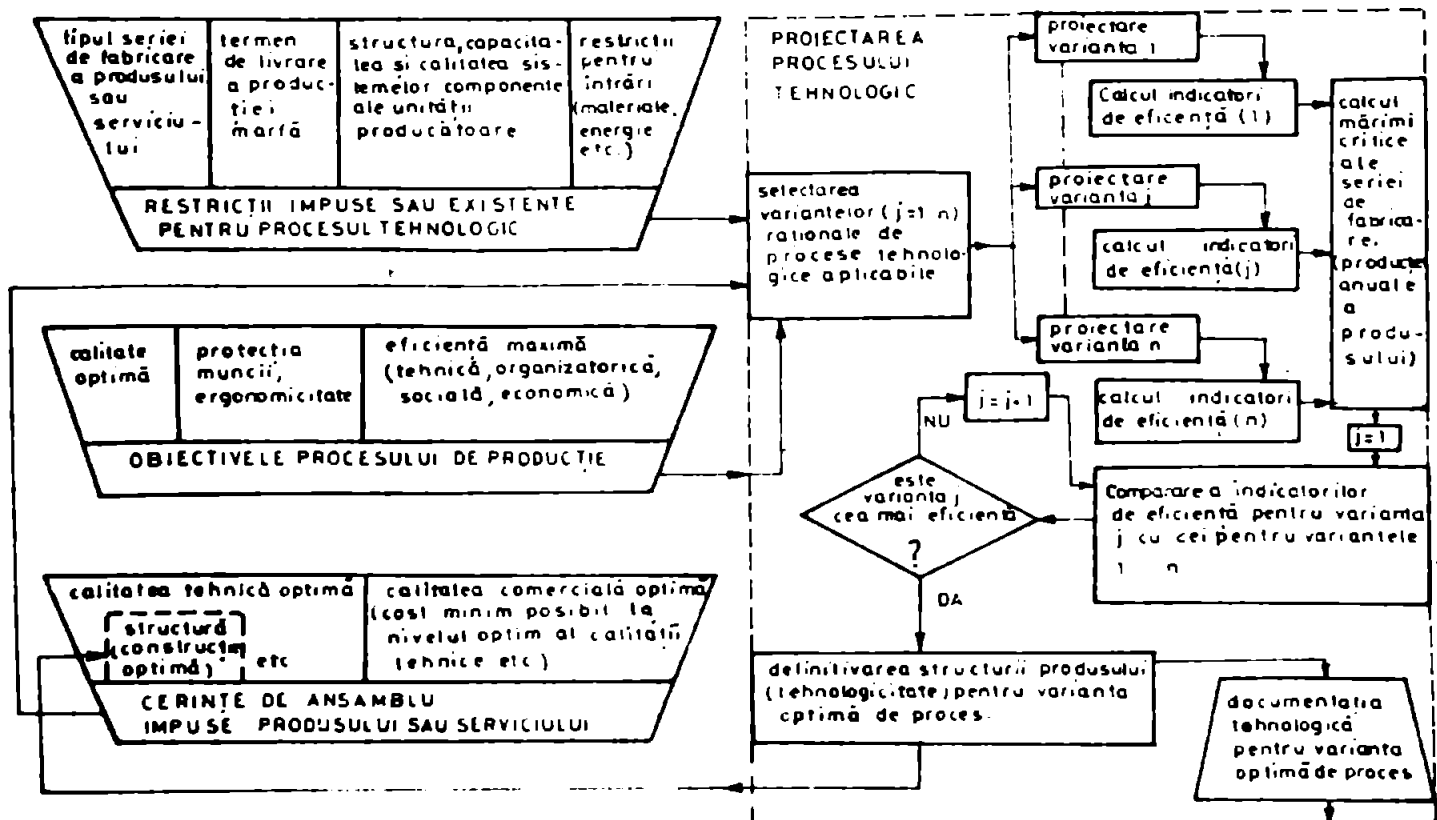


Fig.8.1.Principiul proiectării și alegerii procesului tehnologic optim

Corespunzător acestor indicatori diferiți de eficiență se calculează distinct mărimea critică a volumului anual de producție Q_{craj} sau mărimea critică a seriei de fabricație a produsului Q_{crsj} (tabelul 8.1).

În cazul mai multor procese tehnologice comparate $j = 1, 2, \dots, n$ se pot calcula stîtea mărimi critice Q_{cr} , cîte perechi de tehnologii se compară, rezultînd domeniul optim de aplicare a fiecărei tehnologii j . La compararea a două tehnologii, tehnologia mai eficientă economic este /310/ :

- tehnologia cu costuri fixe C_{fix} mai mici, la volume de producție $Q < Q_{cr}$;
- tehnologia cu costuri fixe C_{fix} mai mari la $Q > Q_{cr}$.

Tabelul 8.1.

Relații de calcul pentru mărirea critică a volumului producției la compararea a două variante de tehnologii pentru fabricarea aceluiași produs

<p>Nr. Criteriul de definiție a mării critice a volumului producției</p> <p>1. Economii maxime la cheltuielile anuale recalculate $S_{Kaj} \rightarrow \text{max. și eficiența investițiilor suplimentare } e_{sj} > e_{na}$</p> $e_{sj} = \frac{(C_{varuo} - C_{varuj}) + \frac{C_{fixao} - C_{fixaj}}{Q_{craj}}}{(I_{varuj} - I_{varuo}) + \frac{I_{fixaj} - I_{fixo}}{Q_{craj}}} \geq e_{na}$	<p>Mărirea critică Q_{cra} a volumului anual de producție sau Q_{crs} a seriei de fabricație a produsului.</p> $Q_{craj} = \frac{(C_{fixaj} - C_{fixao}) + e_{na} (I_{fixj} - I_{fixo})}{(C_{varuo} - C_{varuj}) + e_{na} (I_{varuo} - I_{varuj})} \cdot \frac{\text{buc}}{\text{an}}$ <p>(8.1)</p>	<p>Domeniul eficienței de aplicare a tehnologiilor</p> <p>- pentru tehnologia j : $Q_{anj} > Q_{craj}$</p> <p>- pentru tehnologia o : $Q_{ano} < Q_{craj}$</p>
<p>2. Egalitatea costurilor complete comerciale $C_{cco} = C_{ccj}$</p> $Q_{crj} \cdot C_{varuo} + C_{fixo} = Q_{crj} \cdot C_{varuj} + C_{fixj}$	<p>(8.2)</p> $Q_{craj} = \frac{C_{fixaj} - C_{fixao}}{C_{varuo} - C_{varuj}} \cdot \frac{\text{buc}}{\text{an}}$ <p>(8.3)</p> $Q_{crsj} = \frac{C_{fixsj} - C_{fixso}}{C_{varuo} - C_{varuj}} \cdot \frac{\text{buc}}{\text{serie}}$	<p>- pentru tehnologia j : $Q_{anj} > Q_{craj}$</p> <p>$Q_{sj} > Q_{crsj}$</p> <p>- pentru tehnologia o : $Q_{ano} < Q_{craj}$</p> <p>$Q_{so} < Q_{crsj}$</p>
<p>3. Egalitatea costurilor tehnologice $C_{tfo} = C_{tj}$</p> $Q_{crj} \cdot C_{tvuo} + C_{tfo} = Q_{crj} \cdot C_{tvuj} + C_{tj}$	<p>(8.4)</p> $Q_{craj} = \frac{C_{tfej} - C_{tfeo}}{C_{tvuo} - C_{tvuj}} \cdot \frac{\text{buc}}{\text{an}}$ <p>(8.5)</p> $Q_{crsj} = \frac{C_{tfsj} - C_{tfsso}}{C_{tvuo} - C_{tvuj}} \cdot \frac{\text{buc}}{\text{serie}}$	<p>- pentru tehnologia j : $Q_{anj} > Q_{craj}$</p> <p>$Q_{sj} > Q_{crsj}$</p> <p>- pentru tehnologia o : $Q_{ano} < Q_{craj}$</p> <p>$Q_{so} < Q_{crsj}$</p>

Seminificațiile simbolurilor din tabelul 8.1 sînt :

- indicii o și j reprezintă varianta de bază, respectiv varianta comparată ($j = 1, 2, \dots, n$);
- indicii a și s reprezintă volumul de producție anuală, respectiv al seriei (total);
- indicele u reprezintă costuri unitare, în (lei/buc);
- e_{sj} - coeficientul eficienței anuale a investițiilor suplimentare pentru tehnologia j (tabelul 3.2);
- e_{na} - coeficientul eficienței anuale normative absolute a investiției, specific ramurii industriale în care se aplică tehnologiile respective;
- C_{varu} - cost variabil unitar pe obiect fabricat cu tehnologia respectivă (lei/buc);
- C_{fix} - cost fix total anual sau al seriei, (lei/an), (lei/serie);
- I_{varu} - investiții variabile unitare pe obiect fabricat, (lei/buc)
- I_{fix} - investiții fixe necesare pentru aplicarea tehnologiei respective, (lei) ;
- Q_{an} - volumul anual al producției realizate cu tehnologia respectivă, (buc/an) ;
- Q_{cr} - mărimea critică a volumului producției în unitatea de timp a perioadei de plan considerate, (buc./u.t.p.p.);
- C_{cc} - cost complet comercial pentru volumul de producție realizat cu tehnologia respectivă, (lei/an), (lei/serie);
- C_t - cost tehnologic pentru volumul producției realizat cu tehnologia respectivă, (lei/an), (lei/serie) ;
- C_{tvu} - cost tehnologic variabil, unitar, pentru procesul respectiv, (lei/buc) ;
- C_{tf} - cost tehnologic fix total anual sau al seriei, (lei/an), (lei/serie).

Această metodică "post proiectare detaliată a tehnologiilor comparate" pune în evidență numai ultimul criteriu de decizie (K_{tn} sau C_{cc} , sau C_t) și nu poate fi utilizată convenabil la determinarea domeniului aplicării optime a procedeelor de fabricare a electrozilor ET, din cauza volumului prea mare de calcule. Se impune (fig.2.2), cel puțin pentru selecția primară a soluțiilor de fabricare a componentei active (1.1) a ET (fig.4.1), luarea unor decizii multicriteriale, atât la alegerea materialului (decizie necesară pentru aprovizionare), cât și la alegerea procedeelor de fabricare (decizie necesară pentru investiții, asigurare forță de muncă, pregătire tehnică a fabricației ET).

În cazul unei întreprinderi specializate pe anumite produse care necesită capacități de producție importante pentru prelucrarea electroerozivă, sau în cazul unei secții sculărie producătoare de matrițe și ștanțe, apar deci două etape decizionale importante în pregătirea fabricației electrozilor:

1). Alegerea materialului pentru electrozi și stabilirea tipodimensiunilor de semifabricate sau materiale ce trebuie aprovizionate, pe baza criteriilor a_P , δ_0 , n_E , A_{tE} , în următoarea succesiune:

a) determinarea cu relația (7.23) a abaterii relative minime a_{Pmin} , care poate fi considerată ca uzura relativă liniară minimă admisibilă :

$$a_{Pmin} = \lambda_{Lmin} = \left| \frac{0,3 T_{dP}}{L_P} \right|_{min} \quad (8.6)$$

b) compararea valorilor λ_{Lmin} cu valorile uzurii relative volumice δ_0 pentru diverse materiale de electrozi în cazul utilajelor de prelucrare electroerozivă disponibile și alegerea materialului ET, ținând seama de accesibilitatea comercială;

c) determinarea ariilor A_{tE} maxime și minime ale proiecției suprafeței active a electrodului pe un plan transversal pe direcția de avans, pentru cazul concret al unei fabricații;

d) determinarea pe mărci a tipodimensiunilor de semifabricate și cantităților de materiale necesare pentru electrozi, ținând seama și de mărimea medie a loturilor de electrozi n_{Emed} (relația 7.22).

2). Alegerea procedeelelor de fabricare a componentelor active (1.1) a electrozilor (fig.4.1), pe baza criteriilor A_{tE} , K_{aE} , R_{aE} , în următoarea succesiune:

a) alegerea materialului pentru electrod, funcție de mărimea A_{tE} și de tipodimensiunile de materiale disponibile;

b) alegerea procedeeului de fabricare a electrodului funcție de complexitatea analitică K_{aE} a suprafeței geometrice active a ET (fig.3.1), de abaterea medie aritmetică R_{aE} a profilului microneregularităților (rugozitatea) suprafeței active a ET, de reproductibilitatea suprafeței active și de posibilitatea de condiționare a electrodului uzat.

Criteriul „rugozitate” necesită o precizare interesantă. Deoarece pînă în prezent (§ 5.3.2) prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei nu poate realiza la piesă o rugozitate

mai mică decât $R_{aP} = (0,2...0,4) \mu\text{m}$ și un număr mare de procedee de prelucrare a suprafeței active a ET realizează clasa 1 sau 2 de precizie a prelucrării (tabelul 8.2), este inutilă realizarea la ET a unei rugozități $R_{aE} = (0,01...0,2) \mu\text{m}$ prin lustruire, rodare, superfinisare. Ținând seama de aceasta și de faptul că funcțional electrodul trebuie realizat cu dimensiuni liniare și unghiulare în clasa 2 de precizie (IT 6), în majoritatea cazurilor se poate recomanda /85/ corelația (8.7), reprezentată în fi-

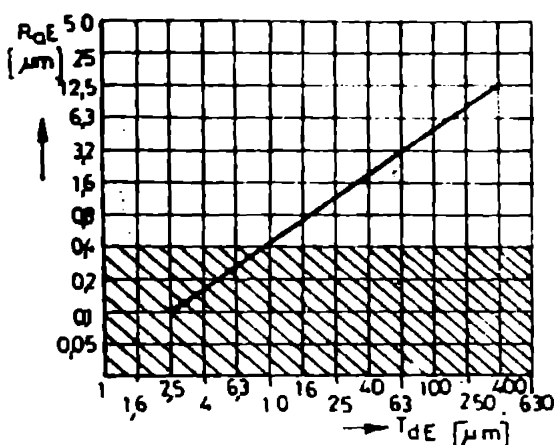


Fig.8.2. Relația rugozitate-toleranță la fabricarea suprafeței active a electrozului.

gura 8.2, dintre rugozitatea suprafeței active și toleranța dimensională liniară de prelucrare a suprafeței ET :

$$R_{aE} = 0,1 \cdot T_{dE}^{0,8} \geq 0,4 \mu\text{m} \quad (8.7)$$

Pe baza datelor din literatura de specialitate /16, 32, 34, 54, 68, 83, 85, 92, 167, 176, 192, 201, 208, 227, 237, 356, 359, 373, 381, 422, 439, 454, 455, 456, 458/ și a studiilor efectuate în cadrul acestei lucrări, în tabelul 8.2 se

sintetizează cu exprimare cantitativă și calitativă nivelul principalelor performanțe ce pot fi realizate cu procedeele cunoscute de fabricare a componentei active (1) a electrozului (fig.4.1) pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, respectiv uzura relativă γ_0 în cazul utilizării generatoarelor de impulsuri comandate actuale.

Pe baza criteriilor prezentate în tabelul 8.2 și a etapelor decizionale indicate anterior, se pot stabili următoarele materiale și domenii optime de aplicare a procedeelelor de fabricare a electrozilor :

I. Pentru secțiunile sculărie dotate cu 1...2 mașini electroerozive cu copierea formei: ca material cupru electrolitic Cu 99,95 k, Cu 99,95 (STAS 270/1-74), grafit EKL-E6 produs de Elektrokohle Lichtenberg RDG sau grafit BEPG de proveniență URSS; ca procedee așchiere și eroziune chimică;

II. Pentru secțiunile sculărie și întreprinderile specializate dotate cu mai mult de 3 mașini electroerozive cu copierea formei: ca materiale Cu 99,95 k, Cu 99,95 (STAS 270/1-74), grafit EKL-E6 sau BEPG, pseudoslaaj 75 % C - 25 % Cu, posibil de livrat de Sinterom Cluj; ca procedee, așchiere, eroziune chimică, galvanoplastie.

Tabelul 8.2.

Performanțe ale procedeeelor de prelucrare a componentei active a electroodului

Nr. crt.	Denumire		la suprafața activă a ET						la proces v_{pkmed} (cm/s)	uzură rel. ET: γ_0 pt. generat. comanda- te
	Me- to- dă	obiect de transfer, de ge- nerare a su- prafeței	K_{AE} pt. supra- fața activă a ET	A_{TE} sau m_E /cm ² ; kg/	T_{dE} /mm/ sau clasa de preci- zie	R_{AE} pt. su- prafața ac- tivă a ET /Mm/				
1	forme	pereti groși	mare	...10000 kg	cl.5...8	6...100	4.10 ⁻⁵ ...	mare		
2	temporare	pereti subtiri	mare	... 300 kg	cl.4...7	6... 25	mare			
3	forn	cochilie	mare	... 7 kg	cl.4...7	1,6...25	mijl.			
4	durabile	matrită	mare	... 20 kg	cl.3...6	0,4...12,5	mijl.			
5	trăgere	filieră	mijl.	... 5 cm ²	0,05...0,1	0,2...6	mică			
6	extrudare	matrită	mijl.	... 300 cm ²	0,2...0,5	0,2...50	mică			
7	forjare	liberă, prof.	mic	... 100 kg	0,1...2,5	6...100	mare			
8		în matrită	mare	... 200 kg	cl.6...8	0,8...50	mijl.			
9	ambutis.	matrită	mijl.	...3000 cm ²	cl.5...7	0,8...12,5	mică			
10.	AGR.PULBERI	matrită	mijl.	... 200 cm ²	cl.3...4	0,8...6	f.mică			
11	TĂIERE T.A.	ștanță	mijl.	...1000 cm ²	cl.4...7	1,6...12,5	mică			
12	strunjire	rotație, filet	mijl.	...5000 cm ²	cl.1...5	0,2...12,5	mică			
13		copiere	mare	...3000 cm ²	cl.2...5	0,2...12,5	mică			
14	robotare	rectilinie	mic	...100000cm ²	cl.3...5	1,6...12,5	mică			
15		profilată	mijl.	... 500 cm ²	cl.2...4	0,4...12,5	mică			

Tabelul 8.2. - continuare

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	ASCHIERE	bughiere, lărgire		mic 100 cm ²	cl.3...7	0,8,,25	10...5.10 ²	mică
17		frezare	cilindr, front.	mică	... 3000 cm ²	cl.3...7	0,8...6,2	6:10 ² ...	mică
18			rulare	mijl.	... 1000 cm ²	cl.2...5	0,8...3		mică
19			copiere	mare	...10000 cm ²	cl.4...5	3...25	...2.10 ²	mică
20			abraziune	mic	...10000 cm ²	cl.2...3	0,1...3,2	2.10 ³ ...	mică
21			rectif.profil	mare	... 500 cm ²	cl.1...3	0,1...3,2		mică
22		copiere orbit.	mare	... 3000 cm ²	cl.3...6	0,8...25	...5.10 ³	f.mică	
23		EROZIUNE CHIM.		mare	...50000 cm ²	cl.7...9			
24	DEPURARE	electroch.	model	f.mare	...50000 cm ²	cl.1...3	0,1...6	10 ⁻⁷ ...10 ⁻⁵	f.mică
25		metaliz.	flacăără	mare	... 500 cm ²	cl.5...8	6...100	3.10 ⁻⁴ ...	mare
26			arc electric	mare	... 500 cm ²	cl.5...8	6...100		mare
27			plasmă	mare	... 500 cm ²	cl.4...7	6...100	...4.10	mijl.

III. In general sînt eficiente în cazuri particulare și următoarele:

- a). Pentru prelucrarea oțelului: ca material cupru sinterizat;
- b). Pentru operații de degroșare și în general precizii mici de prelucrare: ca materiale oțel carbon, alamă Am 63 (STAS 95-67); ca procedeu metalizare, turnare, forjare;
- c). Pentru operații de prelucrare a orificiilor - procedee de tragere sau extrudare;
- d). Pentru cazul disponibilității comerciale bune a grafitului, ca procedeu - abraziunea orbitală, la fabricație în serie mijlocie și mare.

Dacă în secțiile de sculărie și în întreprinderile specializate în fabricația matrițelor se aplică procedeele menționate anterior, se poate desfășura a treia etapă decizională, de selecție a procesului tehnologic optim de fabricare a electrozilor, pentru fiecare caz concret, după criteriul cost cu electrozii C_{Ec} (relația 7.28) sau după criteriul cost al prelucrării (tabelul 8.1).

8.2. Posibilități de creștere a productivității prelucrării suprafeței active a electrozilor de transfer.

Reducerea costurilor cu electrozii necesari prelucrării electroerozive a unei cavități C_{Ec} depinde în mare măsură (relația 7.28) de creșterea productivității fabricării ET și în mod deosebit de creșterea productivității prelucrării componentei active (1) a electrodului (fig.4.1), caracterizată în general de maximul gradului de dificultate K_{pmax} a prelucrării dimensionale (fig.3.1).

Productivitatea fabricării componentei active (1) a ET se exprimă diferit, funcție de nivelul sistemului considerat:

- a) sistem tehnologic SATO; b) spațiu de lucru SL al acestuia; c) spațiul de lucru elementar SLE al SL. În mod corespunzător, căile creșterii productivității fabricării componentei (1) sînt specifice: a) soluții tehnico-organizatorice la nivelul pregătirii fabricației și al organizării locului de muncă; b) îmbunătățiri ale metodelor de generare a suprafeței reale (1); c) creșteri ale vitezelor de desfășurare a proceselor fizico-chimice în spațiul de lucru.

Productivitatea operației de prelucrare a suprafeței reale active j a electrodului ET pentru cazul unui procedeu k dat,

poate fi exprimată în principiu prin norma de producție N_{Pkj} realizată de SATO considerat :

$$N_{Pkj} = \frac{1}{N_{Tkj}} = \frac{1}{t_{bk} + t_{ak} + \frac{T_{pik}}{n_E} + T_{slk} + T_{irk}} = \frac{1}{t_{bk} + T_{rk}} \quad \text{/buc/oră/} \quad (8.8)$$

în care: t_{bk} (ore/buc) - timp de bază necesar pentru desfășurarea propriu-zisă a generării suprafeței reale active j a electrodului; t_{ak} (ore/buc) - timp ajutător; T_{pik} /ore/ - timp de pregătire-încheiere; n_E /buc/ - mărimea lotului de electrozi ET; T_{slk} (ore/buc) - timpul de servire a locului de muncă; T_{irk} (ore/buc) - timpul de intreruperi elementare.

Productivitatea generării suprafeței reale active j a electrodului ET pentru cazul unui procedeu k dat poate fi exprimată, analog, la nivelul SL, prin relația :

$$N_{Gkj} = \frac{1}{t_{bk}} = \frac{Q_{Pk}}{V_{Pjk}} = \frac{A_{Pk} \cdot v_{Pkmed}}{A_{Pj} \cdot H_{Pjmed}} \quad \text{/buc/oră/} \quad (8.9)$$

în care: Q_{Pk} ($\text{cm}^3/\text{oră}$) - productivitatea procesului operației k (solidificare-răcire; deformare plastică; presare-agregare de pulberi; aşchiere; eroziune; depunere etc.) pentru o anumită metodă de generare a suprafeței; V_{Pjk} (cm^3/buc) - volumul de material din electrodul ET ce trebuie supus operației k , pentru a se realiza prelucrarea suprafeței reale active j a ET; A_{Pk} / cm^2 / - aria suprafeței active a obiectului de transfer OT pentru o anumită metodă de generare a suprafeței electrodului, prin care se transferă informație și energie în spațiul de lucru al prelucrării; A_{Pj} / cm^2 / - aria suprafeței active j a electrodului ce trebuie generată; H_{Pjmed} (cm/buc) - înălțimea medie a volumului de material din obiectul supus operației k de generare a suprafeței active j a electrodului; v_{Pkmed} (cm/oră) - viteza medie a desfășurării procesului operației k

Funcție de metoda de generare a suprafeței, transferul de energie și informație de la OT în spațiul de lucru se face prin suprafețe active de diferite mărimi:

a) la generarea suprafeței cu copierea formei componentei active a obiectului de transfer (turnare în forme statice, matrițare, depunere electrochimică, depunere prin metalizare, eroziune chimică etc.) aria suprafeței active a OT are valoare maximă :

$$A_{Pk} = A_{Pj} \quad \text{/cm}^2/ \quad (8.10)$$

b) la generarea suprafeței prin integrarea urmei

(strunjire sau rabotare cu cuțit neprofilat etc.) sau tangentă dublă (frezare prin copiere etc.) aria suprafeței active a OT are valoarea :

$$A_{Pk} = s.t.10^{-2} \quad /cm^2/ \quad (8.11)$$

în care: s (mm/rot) sau (mm/c.d.) - avansul, care mai poate fi considerat la generarea suprafeței ca lungimea proiecției generatorii materializate de OT pe un plan tangent la suprafața geometrică generată; t /mm/ - adâncimea de așchiere.

Deoarece $s.t.10^{-2} \ll A_{Pj}$, rezultă că generarea suprafeței cu copierea formei OT este cea mai productivă dacă se realizează valori suficient de mari ale vitezei v_{Pkmed} . Această concluzie este confirmată în practică în primul rând de productivitatea foarte înaltă a generării suprafeței active a electrodului prin abraziune orbitală a grafitului, la care v_{Pkmed} are valori foarte ridicate /167, 175, 180, 202, 210, 213, 324, 452/.

Valori ridicate ale vitezei v_{Pkmed} prezintă și procedeul de ambutisare cu viteze mari (ambutisare electrohidraulică) /32, 107, 275/, dar grosimea stratului activ de cupru, precizia prelucrării și complexitatea analitică a suprafeței geometrice realizabile au valori insuficiente.

Procedeul de depunere prin metalizare cu aparatură clasică, la care viteza jetului de fluid purtător este subsonică, nu poate realiza caracteristici fizico-mecanice satisfăcătoare ale stratului activ /54, 359/, având o aplicare restrânsă.

Analizând valorile vitezelor v_{Pkmed} date în tabelul 8.2, se constată că îndeosebi procedeele de depunere electrochimică respectiv prin metalizare și procedeul de eroziune chimică necesită în perspectivă creșterea importantă a vitezei v_{Pkmed} la desfășurarea procesului.

Literatura de specialitate /126, 137, 191, 400, 401, 405, 406/ a confirmat deja faptul că dintre procedeele de fabricare a electrozilor cu strat activ, singurul care realizează performanțe înalte în ceea ce privește complexitatea analitică și gabaritul suprafeței, precizia prelucrării dimensionale și durabilitatea la eroziune electrică a materialului electrodului, este procedeul de depunere electrochimică (galvanoplastie). Deci, cercetările pentru creșterea productivității sînt oportune în primul rând în acest caz.

9. Cercetări privind creșterea productivității depunerii electrochimice, cu posibilități de aplicare la fabricarea electrozilor de transfer cu strat activ din cupru.

9.1. Particularități ale sistemelor de acțiune tehnologică pentru operații de prelucrare dimensională prin depunere electrochimică (galvanoplastie).

Prelucrarea dimensională prin depunere electrochimică (galvanoplastie) este o metodă cunoscută de aproape 150 ani (Iakobi 1836), aplicată industrial încă din a doua jumătate a secolului XIX și aflată într-o nouă dezvoltare în ultimele trei decenii /98, 230, 273, 312/. În prezent se fabrică în mod curent prin galvanoplastie piese de formă foarte complicată cu caracteristici fizico-chimice speciale, cu gabarite pînă la 10 m^2 (în construcția de matrițe, piese de mașini și aparate cu caracteristici speciale, electrozi de transfer pentru prelucrarea electroerozivă etc.), la precizii de $\pm 1 \mu\text{m}$, rugozități pînă la $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ și costuri mai mici cu 50 %... 50 de ori față de alte procedee convenționale /33, 132, 147, 150, 204, 233, 277, 280, 357, 368/. Dacă la galvanoplastie clasică, în electroliți clasici și cu activare prin barbotare sau mișcare lentă a catodului, viteza de depunere este mică $v_{\text{pkmed}} = 0,007...0,09 \text{ mm/h}$ /126, 147, 149, 191, 230, 347/ în cazul unor electroliți speciali pe bază de sulfamat de nichel, se pot realiza viteze de depunere foarte mari $v_{\text{pkmed}} = 1 \text{ mm/h}$ /33, 150, 230, 357/.

Așa cum s-a arătat la subcapitolul 3.2 și la § 5.5.2, galvanoplastia este o metodă de prelucrare dimensională fără contact între obiectul de transfer OT (modelul electroconductor sau electroconductibilizat, conectat drept catod al celulei electrolitice) și materialul de adaos MA (metal sau aliaj conectat drept anod). Mediul de lucru ML este un electrolit (soluție apoasă a unei sări a metalului MA), iar agent fizico-chimic AFC este electrolitul din câmpul electric generat în interstițiul dintre electrozi de către echipamentul electric de alimentare. Obiectul prelucrat OP este coaja metalică depusă electrochimic pe suprafața activă a OT, generarea suprafeței piesei galvanoplastice făcîndu-se prin copierea formei OT. În electrolitul ML se pot introduce, după necesități, materiale de protecție MP pentru a asigura caracteristici structurale necesare la piesa P, respectiv se degajă deșeuri DP în urma desfășurării proceselor în spațiul de lucru SL al sistemului de acțiune tehnologică SATO (fig.2.3).

Procesele fizico-chimice ce se desfășoară în spațiul de lucru SATO prezintă o complexitate deosebită și realizarea unor performanțe înalte ale galvanoplastiei a necesitat perfecționarea remarcabilă atât a celulelor de electroliză (cuvă, electrozi MA și OT, electrolit ML, contacte pentru electrozi etc.) cât și a diverselor echipamente funcționale ale instalației: echipamentul de alimentare cu energie electrică, echipamente de circulație și filtrare a electrolitului, echipamente de termostatare a celulei, echipamente de control a parametrilor procesului (pH, temperatură, concentrații substanțe în electrolit, tensiune, curent etc.), echipamente de comandă, inclusiv pentru schimbarea periodică a polarității de conectare a electrozilor /20, 98, 99, 121, 230, 273, 312, 319, 320/. În prezent se impune efectuarea de cercetări în mod deosebit pentru a înlătura trei importante dezavantaje ale galvanoplastiei clasice /172, 220, 404/ : imposibilitatea copierii canalelor înguste sau cu unghiuri ascuțite, depunerea neuniformă a metalului, durata mare a prelucrării din cauza valorilor mici ale vitezei de depunere v_{Pkmed} a metalului la catod.

9.2. Stadiul actual al prelucrării prin depunere electrochimică a stratului activ al electrozilor de transfer.

Datorită avantajelor tehnice și economice importante, se manifestă în prezent pe plan mondial extinderea aplicării galvanoplastiei clasice a cuprului la fabricarea stratului activ al electrozilor de transfer necesari prelucrării electroerozive, îndeosebi pentru arii transversale ale electrozilor $A_{TE} \geq 0,5 \text{ m}^2$ /126, 136, 137, 147, 149, 191, 207, 293, 347, 348, 359, 368, 400, 401, 405, 406, 447/. O contribuție importantă la această extindere au adus-o și progresele tehnologiei de fabricare a modelelor /73, 144, 145, 330, 273, 280, 399, 412).

Pentru a elimina dezavantajele depunerii electrochimice se desfășoară în general cercetări și s-au obținut rezultate favorabile în asigurarea uniformității depunerii /155, 232, 273, 282, 268/, respectiv s-au studiat activări ale depunerii prin viteze de curgere mari ale electrolitului ($v > 1,25 \text{ m/s}$), prin iradieri ultrasonice sau sonice /97, 117, 118, 365, 408, 411, 450, 451/. Cu aceste cercetări de început deficiențele sînt atacate, dar nu au fost încă înlăturate.

În România galvanoplastia nichelului se aplică industrial

la București, Jimbolia etc. pentru fabricarea matrițelor de injectat mase plastice /230/ iar galvanoplastia cuprului se aplică la Arad pentru fabricarea matrițelor de păpuși și la Brașov /103/ la fabricarea electrozilor pentru prelucrarea prin eroziune electrică. Un colectiv de la I C P T C M București /182/ a studiat și a elaborat tehnologii tip pentru fabricarea electrozilor cu strat activ prin galvanoplastia cuprului. Toate aceste tehnologii sînt neactivate (eventual se utilizează reversarea curentului și barbotarea electrolitului) și datorită vitezelor mici de depunere nu sînt aplicate pe măsura necesităților la fabricarea electrozilor cu strat activ.

Se impune în primul rînd creșterea productivității depunerii electrochimice la fabricarea electrozilor, fără a diminua caracteristicile cuprului depus în condiții de proces neactivat (101, 316, 400, 402, 405/: compoziție Cu \geq 99,99 %, structură compactă fără pori, termoconductibilitate și electroconductibilitate ridicată ($\rho \leq 0,017241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), rezistență la rupere $\sigma_r = 115...410 \text{ N/mm}^2$, alungire la rupere 20...40 %, duritate 70...110 HB.

Dată fiind complexitatea formei suprafeței active a modelului OT pe care se efectuează depunerea electrochimică a cuprului pentru electrozi, activarea sonică și ultrasonică a procesului prezintă, evident, cel mai mare interes pentru cercetările privind creșterea productivității prelucrării.

Activarea ultrasonică a depunerii electrochimice a straturilor subțiri de cupru (grosimi $g < 0,3 \text{ mm}$) este cercetată satisfăcător /117, 118, 408/, pe această bază fiind posibilă dezvoltarea studiilor și pentru creșterea vitezei de depunere v_{pkmed} la galvanoplastia cuprului. Echipamentul de activare ultrasonică prezintă însă complexitate și costuri ridicate, iar în cazul suprafețelor de formă complicată apare în plus dificultatea activării pe întreaga suprafață activă a modelului OT, ca urmare a directivității liniare pronunțate a oscilațiilor ultrasonice.

Activarea sonică a depunerii electrochimice a cuprului este mai puțin cercetată /97, 118/, deși necesită echipament de activare simplu și relativ ieftin. Este mai ușor de rezolvat activarea sonică pe întreaga suprafață a modelului OT, prin vibrarea zonelor necesare ale spațiului de lucru. În principiu sînt posibile două variante de realizare a activării sonice a depunerii electrochimice :

a). Vibrarea electrozilor OT (-) și MA (+) în scopul eliminării polarizării de concentrație la catod și a eliminării

pasivării anodului în timpul procesului de electroliză. Facsko și Rădoi au demonstrat /97/ că o vibrație a catodului cu o frecvență de 50 Hz și o amplitudine de 2 mm permite o mărire a densității de curent catodice la depunerea cuprului pentru rafinarea electroli- tică de la cea maxim admisibilă de (1...2,5) A/dm² în cazul cato- dului staționar, la 100 A/dm² (deci de 40...100 ori mai mare), fă- ră a se putea constata o înrăutățire sensibilă a depozitului.

b). Vibrarea agentului fizico-chimic AFC, adică a elec- trolitului din câmpul electric generat de către sursa de curent e- lectric în interstițiul dintre electrozi. Această variantă de ac- tivare este prea puțin cercetată, iar în literatura disponibilă rezultatele obținute se referă la cazuri cu totul particulare de frecvențe și amplitudini ale vibrațiilor /118/. Față de vibrarea electrozilor care în general au mase mult diferite, vibrarea AFC prezintă avantajul relativei constanțe a masei de electrolit supus vibrării, la diferite dimensiuni ale electrozilor.

Indiferent de modul activării sonice sau ultrasonice o problemă încă nerezolvată o constituie determinarea parametrilor optimi ai activării în timp cât mai scurt, pentru orice instalație de galvanoplastie și orice caracteristici ale electrozilor MA (+) și OT (-). Rezolvarea teoretică a problemei ridică foarte mari di- ficultăți, fiind vorba de vibrații în medii multifazice, iar pe ca- le experimentală clasică (determinarea grosimii stratului depus) durata cercetării este prea mare.

9.3. Cercetări experimentale privind creșterea productivității depunerii electrochimice a cuprului cu posibilități de aplicare la fabricația electrozilor de transfer.

9.3.1. Obiective și metodică a cercetărilor experimentale.

Productivitatea depunerii electrochimice se poate expri- ma în modul cel mai caracteristic prin productivitatea procesului (relație 8.9) :

$$Q_{Pk} = A_{Pk} \cdot v_{Pkmed} \quad / \frac{\text{cm}^3}{\text{oră}} / \quad (9.1)$$

în care: A_{Pk} /cm²/ - aria suprafeței active a modelului OT utilizat la galvanoplastie; v_{Pkmed} (cm/oră) - viteza medie a desfășurării procesului depunerii electrochimice. În cazul unor catozi OT cu a- ceași aria A_{Pk} , productivitatea depunerii este direct proporțională

cu viteza v_{Pkmed} .

Cu metodele clasice, care permit determinarea prin cântărire a masei de metal depuse, respectiv măsurarea cu metode distructive sau nedistructive a grosimii g a stratului de metal depus /123, 153, 318/, viteza v_{Pkmed} se determină indirect și relativ dificil, fiind necesare multe încercări, de durate mari.

În această situație și în spațiul limitat al acestei lucrări se adoptă următoarele obiective ale cercetării experimentale: în domeniul galvanoplastiei cuprului :

1) elaborarea unei metode rapide de determinare a frecvenței optime de vibrare a electrolitului dintre electrozi OT (-) și MA (+), frecvență la care viteza de depunere v_{Pkmed} este maximă;

2) determinarea frecvenței optime de vibrare a electrolitului (AFC) pentru cazul unei cuve de dimensiuni mici.

De fapt, la determinarea frecvenței optime de vibrare a electrolitului este suficientă determinarea vitezei relative Δv_{Pkmed} , ca diferență dintre viteza de depunere la frecvența studiată și viteza de depunere în cazul electrolitului staționar. Determinarea vitezei se poate face mai ușor indirect, de exemplu prin oscilografiera variației diferenței potențialului de electrod în elementul galvanic cu faze terminale identice:

oțel inoxidabil / electrolit / Cu / oțel inoxidabil

Diferența de potențial apare o dată cu depunerea electrochimică a cuprului pe catodul din oțel inoxidabil și devine maximă în momentul când pe catod s-a format un strat compact de cupru.

9.3.2. Echipamente concepute și realizate pentru cercetarea experimentală a depunerii electrochimice a cuprului.

S-a conceput și realizat un echipament universal pentru determinarea frecvenței optime de vibrare a elementelor spațiului de lucru SL, vibrare efectuată în scopul activării procesului de depunere electrochimică a cuprului sau altor metale.

Echipamentul poate fi utilizat la orice instalație de depunere electrochimică și are structura prezentată în figura 9.1. În cuva C este introdus electrolitul ML și se află imersați electrozii MA (+), OT (-), componând împreună celula de electroliză. Celula de electroliză și echipamentul de alimentare cu energie electrică aparțin instalației de depunere electrochimică care se

cercetează. Pentru cuva de dimensiuni mici utilizată echipamentul de alimentare cu energie electrică este compus din variatorul electronic de tensiune OB 108/1, grupul redresor GR tranzistorizat, rezistența reglabilă R1 și aparatele de măsură ampermetru A1, voltmetru V1.

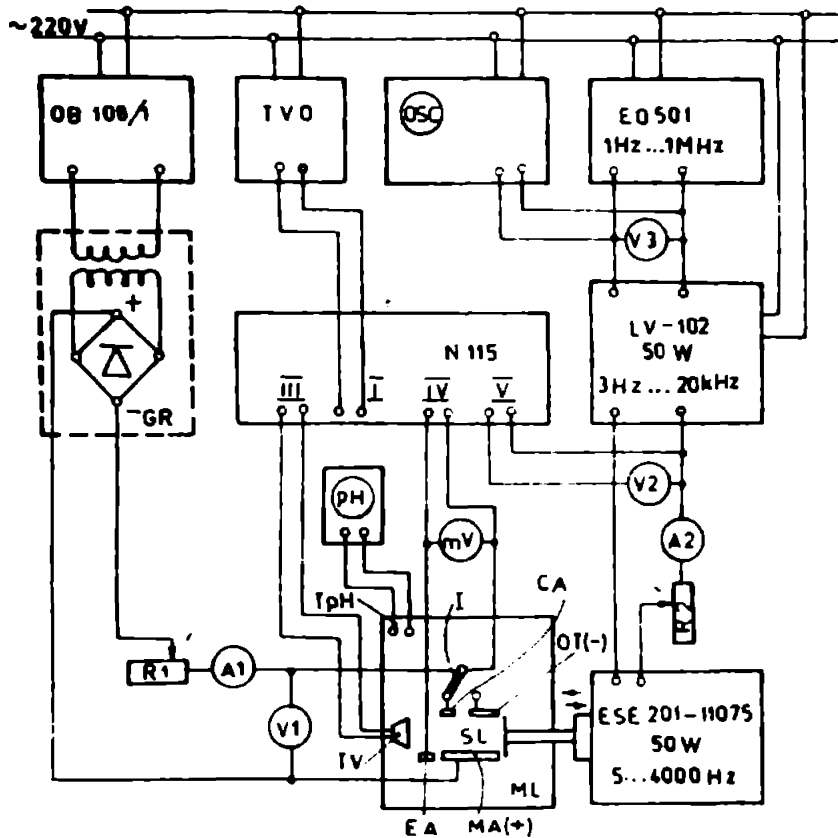


Fig.9.1.Schema de principiu a echipamentului pentru determinarea frecvenței optime de vibrație la activarea sonică a depunerii electrochimice.

toare de putere maximă 40 W, pentru cuve de dimensiuni mari sînt necesare vibratoare de 200 W, 500 W, 1000 W, cu frecvențe și amplitudini reglabile.

Cu ajutorul rezistenței reglabile R2, al aparatelor de măsură voltmetrele V2, V3 și ampermetrul A2, respectiv a osciloscopului OSC este posibilă reglarea suplimentară și controlul parametrilor echipamentului de activare sonică.

Determinarea influenței activării sonice a proceselor de depunere electrochimică se face cu ajutorul elementului galvanic: electrod auxiliar EA (oțel inoxidabil)/ electrolit ML / metal depus electrochimic / catod auxiliar CA (oțel inoxidabil), conectat la milivoltmetrul mV cu ajutorul comutatorului I. Traductorul de pH permite evidențierea modificărilor PH-ului electrolitului, iar traductorul de vibrații TV permite evidențierea vibrațiilor ce se transmit în spațiul de lucru SL.

Echipamentul de activare sonică este compus din generatorul de joasă frecvență E 0501 /461/, amplificatorul LV-102 /462/ și vibratorul electromagnetic ESE 201-11075 /459/ sau electrodinamic VED 1 /142, 143/. Cu vibratorul se realizează vibrarea unor elemente ale spațiului de lucru SL: fie electrozii MA (+) și OT (-), fie electrolitul aflat în interstițiul dintre electrozi ca în schema prezentată în figura 9.1. Pentru cuve de dimensiuni mici și mijlocii se utilizează vibra-

Deoarece aparatura disponibilă de măsurare a vibrațiilor nu conținea traductoare de vibrații în lichide, a fost necesară realizarea unui traductor de vibrații TV original, dintr-un difuzor electromagnetic, o piesă de contact din material plastic și o peliculă de cauciuc pentru impermeabilizare. În primă instanță, funcția acestui traductor este evidențierea frecvenței, a compunerii vibrațiilor în lichid și a maximului amplitudinilor pe direcțiile utile activării proceselor din spațiul de lucru.

La înregistrarea vibrațiilor momentane ale tensiunilor și curenților de la aparate sau traductori se utilizează oscilografii multicanal N 115 /463/ cu galvanometre tip M 1015 /464/, având banda de lucru pe frecvențele 0...9000 Hz. Pentru baza de timp se utilizează un generator de semnal sinusoidal TVO.

O vedere de ansamblu a echipamentului de cercetare experimentală este prezentată în figura 9.2. PH GR

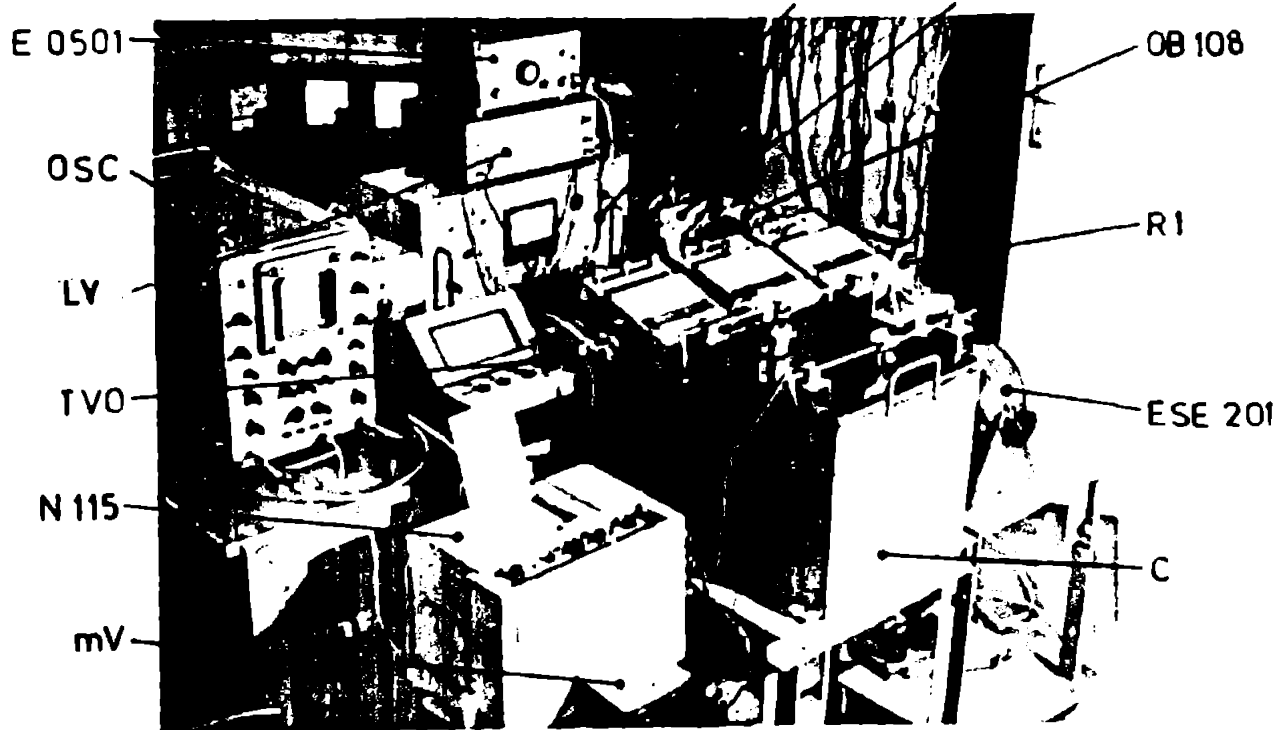


Fig. 9.2. Echipamentul pentru determinarea frecvenței optime de vibrare la activarea sonică a depunerii electrochimice.

9.3.3. Determinarea experimentală a frecvenței optime de activare sonică a depunerii electrochimice a cuprului.

Echipamentul pentru cercetare experimentală descris la § 9.3.2 a fost utilizat la determinarea frecvenței optime de vibrare a agentului fizico-chimic AFC (electrolit în câmpul electric dintre electrozii MA și OT), în cazul depunerii electrochimice a cuprului, la $U = 4V$, $j = 20A/dm^2$, $T = 25^{\circ}C$.

Pe baza recomandărilor literaturii de specialitate /97, 98, 126, 191, 230, 320, 400, 401, 406, 450, 451/ s-au utilizat următoarele componente ale celulei electrolitice (fig.9.1):

a) cuvă Cl din polistiren antișoc cu dimensiuni interioare 250 x 200 x 100 mm și grosime a pereților 4 mm;

b) mediu de lucru ML electrolit acid, în soluție apoasă cu: 220 g/l Cu SO_4 , 48 g/l H_2SO_4 , 80 mg/l Cl din apă potabilă și 0,6 ml/l adaos Novostar Blasberg, cu funcție de micșorare a dimensiunilor grăunților de cupru electrolitic depus;

c) material de adaos MA anod de cupru electrolitic pentru oatozi Cu 99,95 k, STAS 270/1-74 și STAS 642-71 cu dimensiuni 100 x 70 x 10 mm;

d) obiect de transfer OT catod din tablă de oțel inoxidabil 10 NC 180 (STAS 3583-64) cu dimensiuni corespunzătoare cu ale anodului.

O imagine de ansamblu a celulei electrolitice utilizate este redată în figura 9.3.

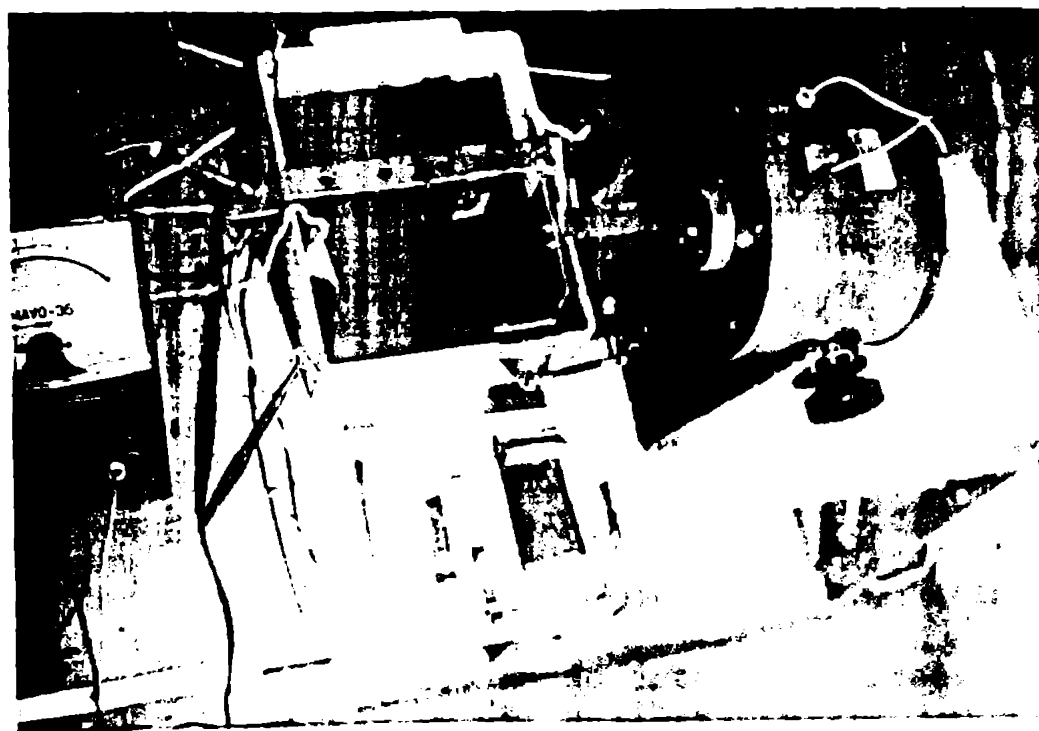


Fig.9.3. Celula electrolitică utilizată pentru determinarea experimentală a frecvenței optime de activare sonică.

Cu ajutorul oscilografului N 115 s-au înregistrat succesiv două grupe de semnale: 1) semnale pentru caracterizarea procesului de vibrare: (I) de la generatorul de semnal sinusoidal TVO; (II) de la ieșirea din amplificatorul LV-102; (III) de la traductorul de vibrații TVimersat în electrolit; 2) semnale (IV) de la fazele terminale din oțel inoxidabil (electrodul auxiliar EA și catodul auxiliar CA) ale elementului galvanic MA/ML/CU/CA.

La toate determinările experimentale s-a menținut constantă puterea la ieșirea din amplificatorul LV-102 (fig.9.1) la nivel de circa 20 W, ceea ce înseamnă că o dată cu creșterea frecvenței, amplitudinea vibrațiilor masei mobile a vibratorului ESE 201-11075 se reduce. Dar, masa mobilă a vibratorului electrodinamic este în contact cu electrolitul aflat în interstițiul dintre electrozi, fapt care modifică caracteristicile vibrațiilor, față de starea neîncărcată.

În conformitate cu caracteristicile dinamice ale vibratorului /143, 459/, în domeniul de frecvențe $f = 30...48$ Hz (deplasat cu 10...15 Hz spre valori mai mari față de starea neîncărcată) s-au constatat amplitudini mari ale vibrațiilor lichidului (fig.9.4 III), corespunzătoare depărtării de frecvența de rezonanță $f = 16$ Hz. Se observă că o dată cu apropierea de $f = 50$ Hz, amplitudinea vibrațiilor în lichid scade și acestea devin armonice. La unele frecvențe ($f = 30; 35; 37; 42$ Hz) s-a constatat o vibrație sensibilă a pereților cuvei C din material plastic, vibrațiile înregistrate fiind nearmonice.

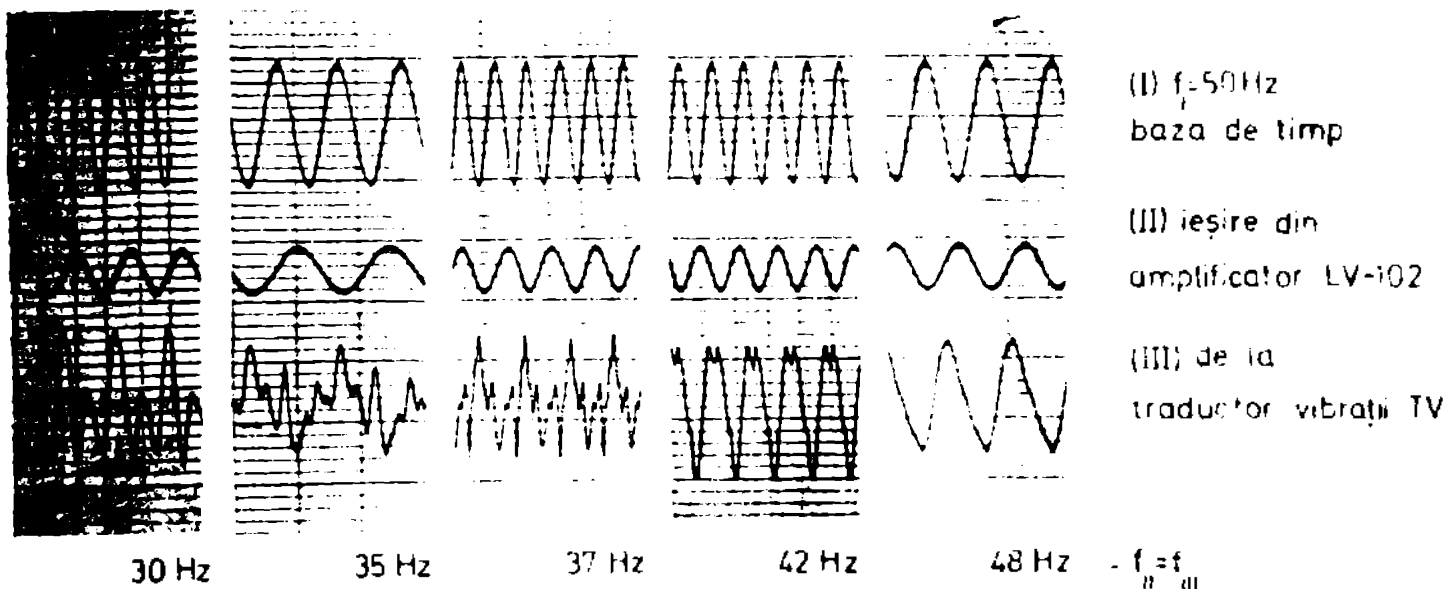


Fig.9.4. Semnale înregistrate la depărtarea de frecvențe de rezonanță ($f_{II} \approx 16$ Hz) a vibratorului.

În figura 9.5 se prezintă înregistrările (I)...(IV) pentru cinci frecvențe ($f_{II} = f_{III} = 35; 50; 75; 108; 140$) selectate din cele 20 determinări efectuate, comparativ cu variația tensiunii la elementul galvanic EA/BI/Cu/CA în cazul electrolitului staționar. Se observă imediat că la frecvența $f_{II} = f_{III} = 75$ Hz amplitudinea vibrațiilor în interstițiul EA (+) / OF (-) este maximă, iar viteza de depunere v_{FKmed} este relativ cea mai mare. Deci, în condițiile celulei electrolitice studiate (fig.9.3) frecvența optimă a activării sonice este $f_{opt} = 75$ Hz.

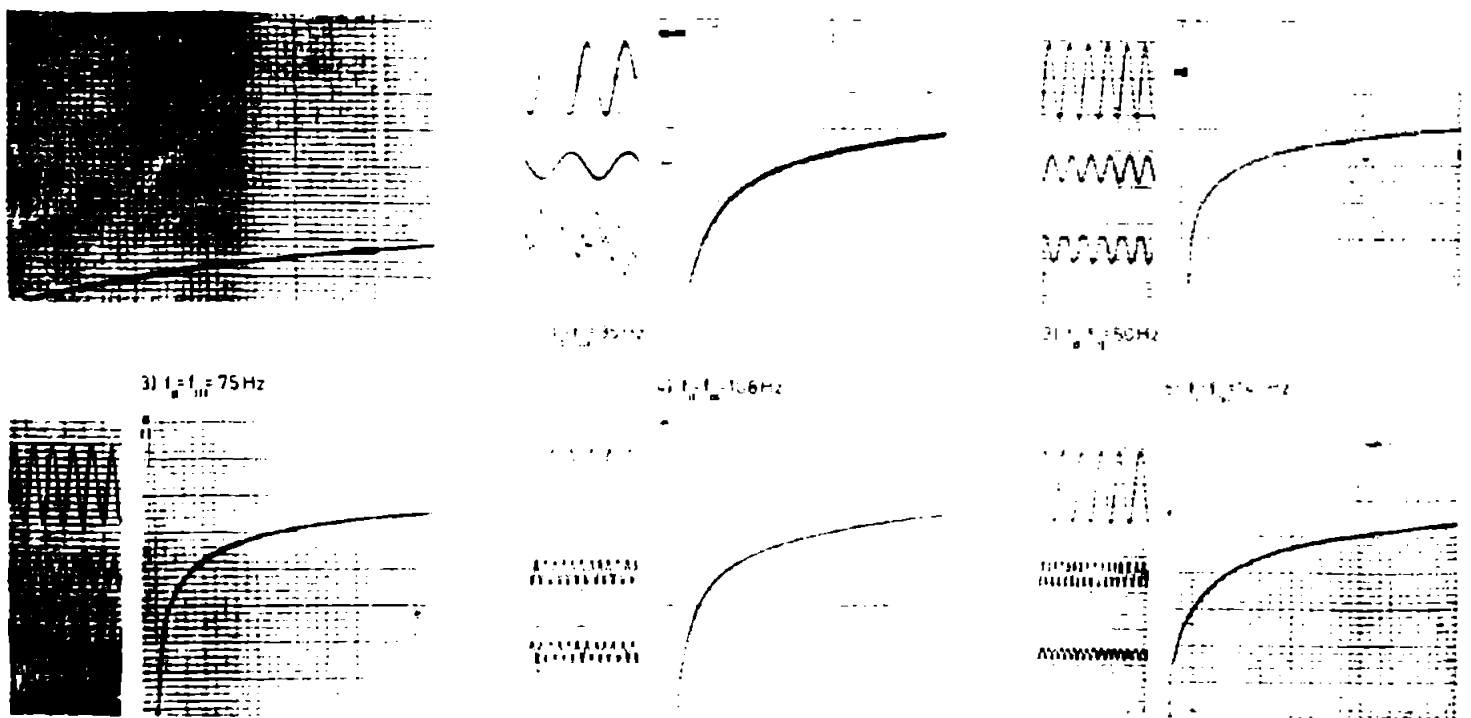


Fig.9.5. Semnale înregistrate la determinarea frecvenței optime de vibrație a electrolitului dintre electrozi.

Dacă se compară curbele IV înregistrate în figura 9.5, rezultă că față de depunerea în electrolit staționar, viteza de depunere v_{Pkmed} crește de 4...5 ori la vibrarea sonică a agentului fizico-chimic, cu frecvență de cca.75 Hz. Luăm peste conta astfel pe

o creștere a productivității depunerii electrochimice a cuprului de cel puțin 4 ori, confirmată și prin cântărire, ceea ce largeste considerabil domeniul de aplicare eficientă a galvanoplastiei la fabricarea electrozilor pentru prelucrarea electroeroziivă cu cupieră forței.

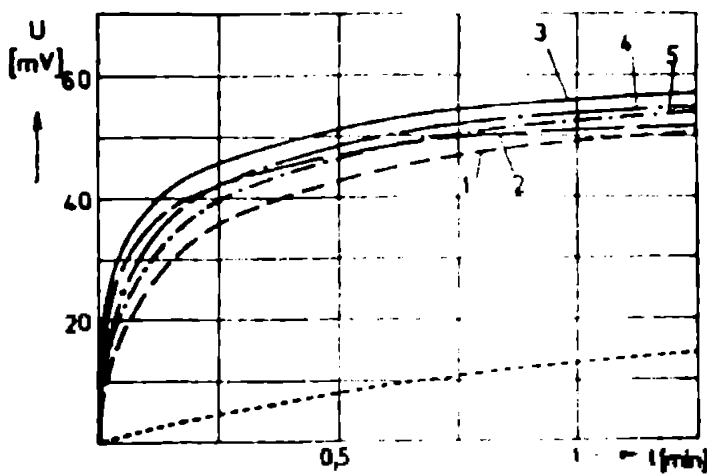


Fig.9.6. Influența frecvenței de vibrație a electrolitului dintre electrozi asupra vitezei de depunere electrochimică a cuprului.

9.3.4. Aplicabilități de aplicare a rezultatelor cercetărilor experimentale la fabricarea electrozilor de transfer pentru prelucrarea electroeroziivă cu cupieră

Cunoscând necesitățile aplicative ale cuprului din industria așchierii și ale Secției de prototipuri și microprototipuri...

politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, s-a conceput și realizat cu un colectiv de studenți /69, 376/, un echipament de prelucrare prin galvanoplastie activată sonic a stratului activ din cupru al electrozilor de transfer de dimensiuni mici (aria transversală a electrodului $A_{tE} \leq 0,1 \text{ m}^2$). Așa cum s-a arătat la subcapitolul 9.2, galvanoplastia neactivată se aplică eficient pînă la valori $A_{tE} \geq 0,5 \text{ m}^2$, ceea ce impune activarea procesului de depunere electrochimică la arii transversale mai mici ale electrozilor.

Cuva C2 a celulei electrolitice (fig.9.2 și fig.9.7) este realizată din tablă de oțel cu grosime de 5 mm cauciucată în interior și de dimensiuni 370 x 370 x 370 mm, fiind posibilă activarea sonică sau ultrasonică a galvanoplastiei. Activarea sonică se poate realiza fie prin vibrarea electrozilor, fie prin vibrarea electrolitului dintre electrozi. În acest scop peretele de jos și cel lateral al cuvei C2 (fig.9.7) sînt realizați cu ferestre și diafragme din cauciuc, dispozitivul de legătură DL permițînd transmiterea vibrațiilor de la unul sau două vibratoare electrodinamice ESE 201-11075 sau VED 1, respectiv a unor vibratoare mai mari, de 200 W. Suportul S de construcție sudată permite montarea cu ușurință a diverselor vibratoare electrodinamice, deoarece poziția plăcilor PR este reglabilă. Electrozii MA (+) și OT (-) se suspendă pe barele anodice și catodice BA respectiv BC, fiind posibilă poziționarea lor cu ușurință în orice punct din plan, datorită unor contacte mobile CM și a unor suporturi rotitori SR.

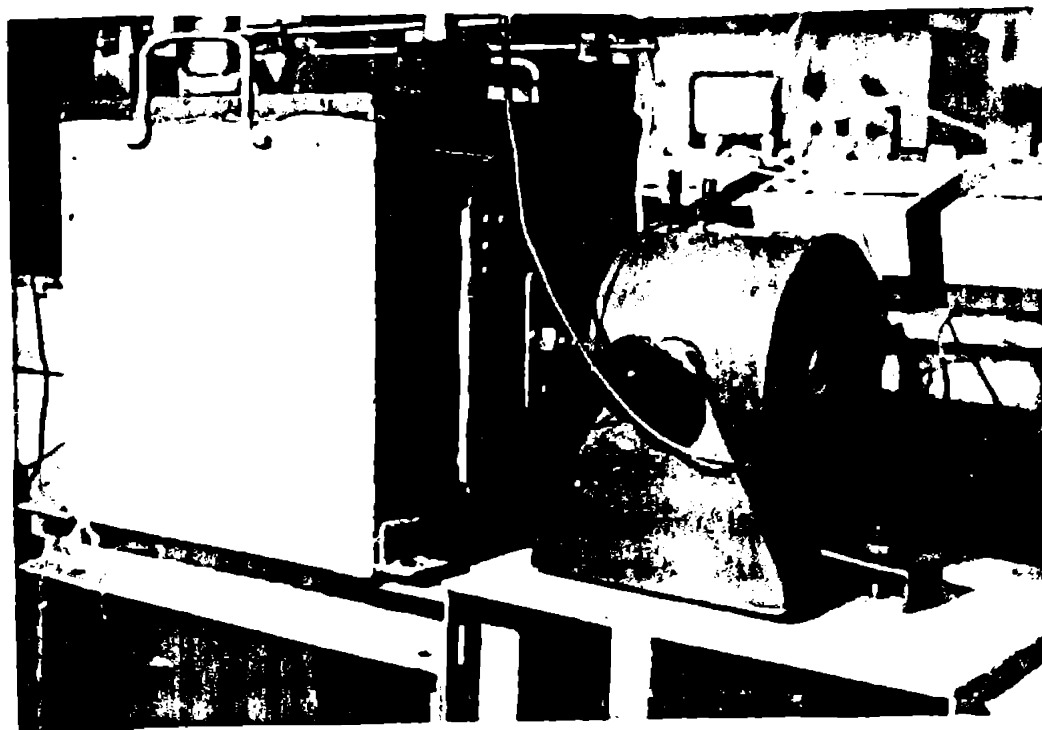


Fig.9.7. Detaliu al echipamentului realizat pentru prelucrare prin galvanoplastie activată sonic.

Așa cum s-a arătat la § 9.3.2 și cum se poate observa în figura 9.2, echipamentul pentru determinarea frecvenței optime de vibrație se atașează fără dificultăți la celula electrochimică și cuva C2, fiind posibilă stabilirea rapidă a frecvenței optime pentru cazuri concrete de gabarite, mase și forme ale electrozilor.

Echipamentul de prelucrare prin galvanoplastie activată sonic este destinat fabricării electrozilor cu strat activ din cupru în cadrul Secției de prototipuri și microproducție a Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara.

10. Influența fabricării electrozilor de transfer asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei.

10.1. Influența fabricării electrozilor asupra caracteristicilor tehnologice ale prelucrării.

Datorită specificului metodei de generare a suprafeței piesei prin copierea formei electrodului de transfer ET, caracteristicile tehnologice ale prelucrării electroerozive sînt influențate direct de caracteristicile tehnologice ale fabricării ET.

Astfel (fig.2.2 și § 3.3.1), complexitatea analitică K_{ap} și dimensiunile D_p ale suprafeței piesei prelucrate electroeroziv au practic valori identice cu valorile K_{ae} și D_e realizate de procesele de fabricare ale electrozilor ET, iar rugozitatea R_{ap} este parțial influențată de rugozitatea inițială R_{ae} , realizată prin fabricare la suprafața activă a ET. Precizia dimensională a fabricării repetate a suprafeței active a ET, caracteristicile de rezistență, rigiditate mecanică și durabilitatea la eroziune electrică a materialului ET, realizate prin fabricare, influențează în mod complex precizia prelucrării dimensionale electroerozive a piesei P.

Așa cum s-a demonstrat la subcapitolul 7.1 (relațiile 7.12 și 7.14), cea mai mare influență asupra preciziei de prelucrare prin eroziune electrică o are durabilitatea electroerozivă $\psi_0 = 1/\gamma_0$ a materialului ET, care este principalul factor de influență al uzurii relative liniare λ_L și deci al eroziunii macroscopice \vec{e}_{uzET} . Literatura de specialitate /39, 106, 108, 112, 175, 187, 206, 208, 327, 359, 372, 422, 431, 445, 446, 453, 454, 456, 465/ demonstrează că pentru actualele generatoare de impulsuri ale utilajelor de prelucrare electroerozivă prezintă valori minimale

ale uzurii γ_0 , deci în general ale uzurii relative liniare λ_L , mai multe materiale produse curent pentru electrozi, sub formă de bare, blocuri, plăci, table sau chiar ca electrozi (tabelul 10.1).

Tabelul 10.1.

Materiale pentru electrozi utilizate preferențial

Nr. crt.	Denumire și caracteristici	Preț lei/dm ³	Aplicare preferențială
1.	Cupru (cu 99,9)	cca. 450	generală
2.	Cupru electrolitic (Cu 99,95k)	700...750	
3.	Cupru electrolitic sinterizat	cca.2000	
4.	Grafit cu granulație mare	cca. 100	prelucrarea oțelurilor și a aliajelor refractare
5.	Grafit compact, cu granulație mijlocie	cca. 500	
6.	Grafit foarte compact, cu granulație fină	cca.1500	prelucrarea aliajelor dure și în general de înaltă precizie sau netezime
7.	Pseudoaliaj WCu (75% W)	cca.12000	

Materialul părții active a ET mai influențează rugozitatea R_{ap} - pseudoaliajul WCu asigurând întotdeauna rugozitatea minimă, la orice regim de lucru dat - cât și productivitatea prelucrării Q_p , care este maximă în cazul utilizării perechilor grafit/oțel sau pseudoaliaj WCu/aliaj dur.

Aceste influențe complexe îngreunează de multe ori alegerea optimă a materialului și procedeul de fabricare a părții active a electrodului. Un factor care limitează deocamdată utilizarea grafitului și a pseudoaliajului WCu îl constituie faptul că încă nu sînt asimilate în producția internă, iar prețurile pe piața internațională cresc rapid de la un an la altul.

10.2. Influența fabricării electrozilor asupra caracteristicilor economice ale prelucrării.

Fabricarea electrozilor determină direct nivelul costului C_{pc} al prelucrării electroerozive a unei cavități, eficiența economică a prelucrării, iar în unele cazuri influențează și productivitatea operației de prelucrare prin eroziune electrică cu copierea formei.

Așa cum s-a arătat anterior (subcapitolul 7.2), norma de

timp pentru operația de prelucrare electroerozivă a unei piese P depinde de numărul n_c de cavități de același tip ce trebuie prelucrate la P și de norma de timp N_{Tc} pentru prelucrarea prin eroziune electrică a unei cavități a P :

$$N_{TP} = n_c \cdot N_{Tc} \quad / \frac{\text{ore}}{\text{buc}} / \quad (10.1)$$

Dacă abaterea relativă a_p determinată la P de către uzura locală a electrodului ET este mai mică decât uzura relativă liniară λ_L (relația 7.23), sînt necesari mai mulți electrozi n_{ET} pentru prelucrarea electroerozivă a unei cavități. În acest caz, variantele de materiale și procedee de fabricare alese pentru ET determină direct valoarea n_{ET} și în mod indirect norma de timp N_{Tc} , respectiv productivitatea W_{Pc} a operației de prelucrare electroerozivă a cavității :

$$W_{Pc} = \frac{1}{N_{Tc}} = \frac{1}{\sum_{t=1}^{n_{ET}} [(t_b + t_a)(1 + k_{s\hat{i}})] t + \frac{T_{p\hat{i}}}{n_p \cdot n_c}} \quad / \frac{\text{buc}}{\text{oră}} / \quad (10.2)$$

în care: $t = 1, \dots, n_{ET}$ - numărul de treceri (electrozi) necesare pentru prelucrarea electroerozivă a unei cavități a P; t_b (ore/buc) - timpul de bază al trecerii t ; t_a (ore/buc) - timpul ajutător pentru o trecere t ; $k_{s\hat{i}}$ - coeficient pentru timpul de servire tehnică-organizatorică și pentru timpul de întreruperi reglementate; $T_{p\hat{i}}$ (ore/lot) - timpul de pregătire-încheiere pentru lotul format de cavitățile în număr $n_c \cdot n_p$ de realizat în cele n_p piese. Relațiile (10.2) și (7.23) demonstrează faptul că productivitatea operației de prelucrare electroerozivă a cavității W_{Pc} crește o dată cu scăderea uzurii relative λ_L și δ_o , deci la utilizarea pentru partea activă a ET a unor materiale și procedee de fabricare ce asigură durabilitate electroerozivă înaltă a ET.

Influența fabricării electrozilor asupra costului C_{pc} al prelucrării electroerozive a unei cavități este pusă în evidență de relația (7.28). Ținînd seama de (10.1), relația (7.28) devine:

$$C_{pc} = 41,5 \cdot N_{Tc} + n_{ET} (35 \sum_{k=1}^q N_{TKE} + C_{mE}) + \frac{C_{SDVE}}{n_p \cdot n_c} \quad / \frac{\text{lei}}{\text{cav}} / \quad (10.3)$$

în care costul C_{pc} cu electrozii ce revine pentru o cavități prelucrată electroeroziv este :

$$\begin{aligned}
 C_{Ec} &= n_{ET} \left(35 \sum_{k=1}^q N_{TKE} + C_{mE} \right) + \frac{C_{SDVE}}{n_P \cdot n_C} = \\
 &= 35 \cdot n_{ET} \sum_{k=1}^q N_{TKE} + n_{ET} \cdot P_{umE} \cdot V_{mE} + \frac{C_{SDVE}}{n_P \cdot n_C} = \\
 &= C_f + C_m + C_S \quad / \frac{lei}{cav} / \quad (10.4)
 \end{aligned}$$

notațiile noi semnificînd: P_{umE} (lei/dm³) - prețul unității de volum din materialul utilizat pentru ET; V_{mE} /dm³/ - volumul de material necesar pentru fabricarea unui electrod.

Relațiile (10.2), (10.3), (10.4) și (7.23) arată cu toată claritatea că ponderea costului C_{Ec} cu electrozii în costul C_{pc} al prelucrării electroerozive a unei cavități date este determinat de materialul ET (natură, volum V_{mE} , preț al unității de volum P_{umE}) și de procesul de fabricare a ET (durata totală a operațiilor de fabricare $\sum_{k=1}^q N_{TKE}$ și costul cu SDV-urile speciale pentru electrozii necesari la prelucrarea unei cavități $C_{SDVE}/n_P n_C$). În principiu, nivelul costului C_{pc} și costului C_{Ec} este cu atît mai mic cu cît componentele N_{Tc} , C_f , C_m , C_S ale relațiilor (10.3) și (10.4) au valori mai mici, ceea ce în final este asigurat de un material de înaltă durabilitate electroerozivă a părții active l.l. a ET (fig.4.1), de o durată totală minimă a operațiilor de fabricare a ET și de o cotă minimă cu SDV-urile speciale pentru electrozi.

Durate totală a operațiilor de fabricare a ET și cota cu SDV-urile speciale pentru electrozi sînt însă determinate de gradul de dificultate K_g a generării suprafeței geometrice active a ET și de coeficientul K_S pentru caracteristicile tehnologice ale suprafeței reale active a ET (fig.3.1). Dacă se compară cavități în OP de volum constant (de exemplu $V_{mE} = 1 \text{ dm}^3$) pentru $n_{ET} = 1$ și se reprezintă relația (10.4) pentru materialele preferențiale utilizate pentru ET (tabelul 10.1) și procedeele de bază (așchiere, galvanoplastie, abraziuneorbitală) recomandate în subcapitolul 8.1 pentru fabricarea electrozilor, se pot stabili funcție de variabile ($K_g + K_S$) domeniile economice de aplicare a fabricării electrozilor. Figura 10.1 prezintă principal această dependență pentru materialele nr.crt. 1, 2, 4, 5, 6, 7 precizate în tabelul 10.1, la prelucrarea suprafeței active fiind utilizată numai așchieres (indice a), galvanoplastie (indice g) sau abraziune

orbitală (indice o) /37, 39, 67, 126, 137, 181, 191, 213, 218, 289, 311, 314, 323, 358, 401, 404, 466/.

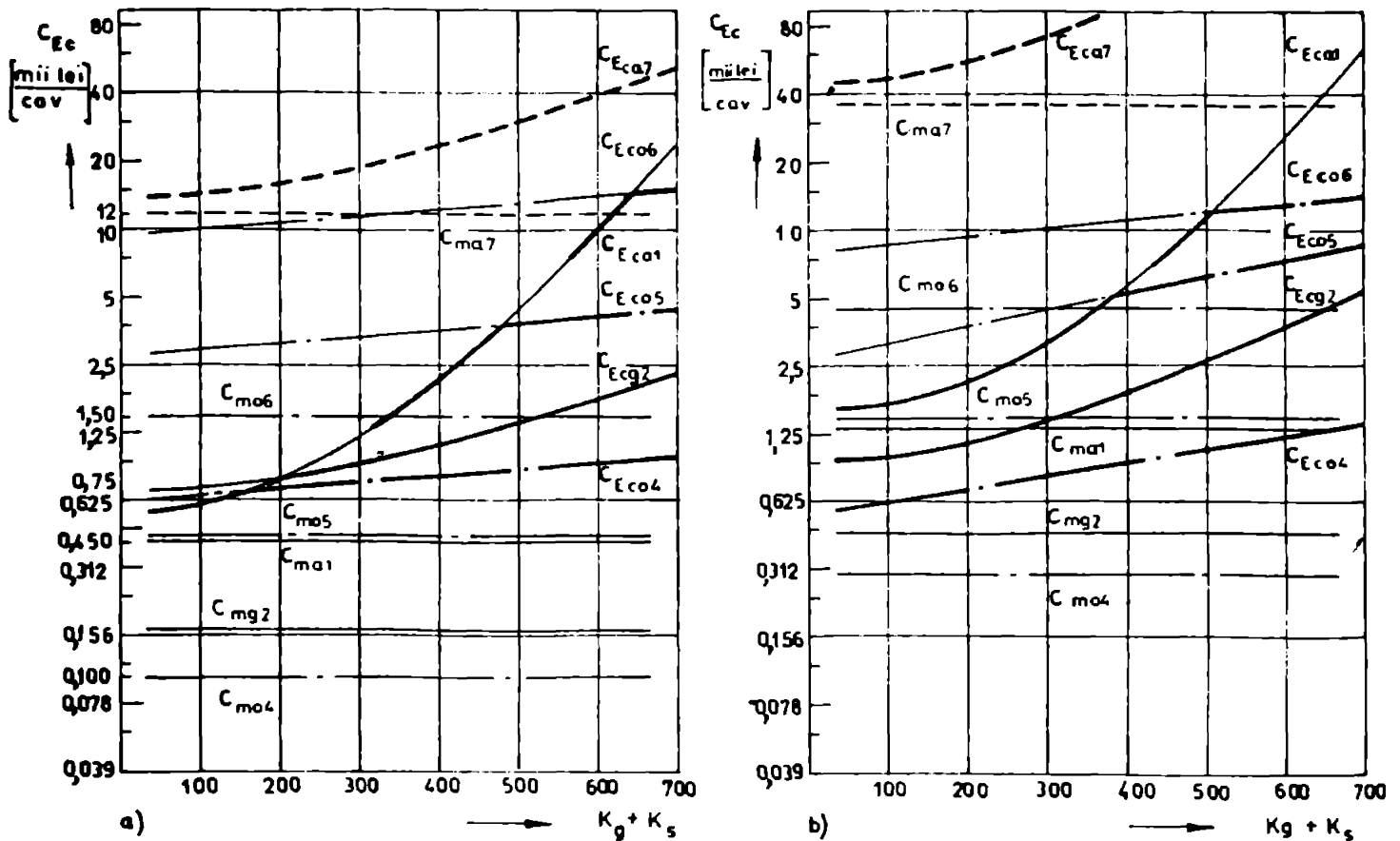


Fig.10.1. Dependența costului C_{Ec} cu electrodul pentru o cavitate dată de dificultatea generării suprafeței și a realizării caracteristicilor suprafeței reale active a electrozilor

— Cu ; - - - grafit; . . . WCu
 a) pentru $n_{ET} = 1$; b) pentru $n_{ET} = 3$

Se observă că în cazul $n_{ET} = 1$ valorile costului C_{Ec} sînt mult apropiate la utilizarea materialelor nr. 1, 2, 4 și respectiv a procedeelor a, g, o. Considerînd suplimentar și criteriul „precizia prelucrării suprafeței ET și OP” este superior la $(K_g + K_s) > 200$ cuprul electrolitic depus galvanoplastic. Dacă $n_{ET} = 3$, costul electrodului din grafit cu granulație mare (tabelul 10.1, nr.4) scade foarte mult, iar costurile electrozilor din cupru electrolitic depus electrochimic în strat de cca. 10 mm și al electrozilor din grafit cu granulație mijlocie devin practic egale.

Considerînd în relația (10.4) mărimile n_{ET} și C_{SDVE} ca parametrii, componentele C_f , C_m și C_s pot fi determinate aproximativ și comparate cu ajutorul diagramei din figura 10.2, pentru valori uzuale ale variabilelor N_{TKE} , C_{ME} și $n_p \cdot n_c$. Diagramele din figurile 7.2 și 10.2 ușurează ridicarea diagramei generale concrete (ca în fig.10.1) și alegerea variantei de fabricare a electrozilor

după criteriul cost minim C_{Ecmin} ce revine pentru o cavitate prelucrată electroeroziv.

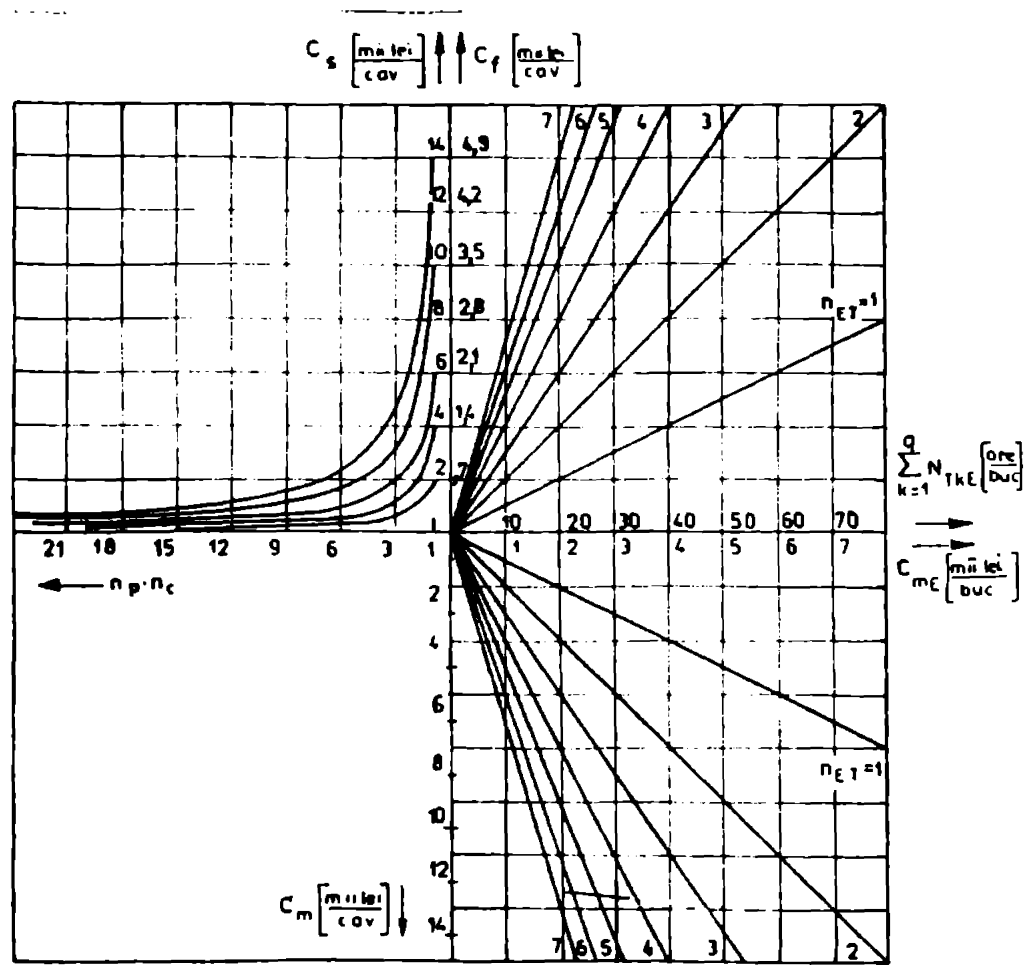


Fig.10.2. Diagramă pentru calculul componentelor costului cu electrozii C_{Ec} .

Intr-un cadru mai larg, legat de gradul de dificultate a prelucrării dimensionale (fig.3.1), prezintă interes deosebit în primul rând, verificarea experimentală a sensibilității acestei variabile agregate K_p , atât prin compararea unor procese și procedee tehnologice diferite de prelucrare a cavităților active ale unor matrițe (așchiere, electroeroziune) cât și prin studierea influenței fabricării electrozilor asupra costului C_{pc} al prelucrării electroerozive a unei cavități.

In figura 10.3 se prezintă dependența $C_{pc} = f(K_p)$ pentru cazul unor cavități de dimensiuni mijlocii, de forme diferite ce s-au realizat în semifabricate din oțel aliat de scule /466/. S-au reprezentat valorile variabilelor C_{pc} și K_p pentru reперele: matriță desen DSP-7-17114-01 ($K_p = 61$); matriță desen DFU-5-17607-03 ($K_p = 107$); poanson desen DFU-5-17607-01 ($K_p = 156$); matriță desen DSP-7-17114-02 ($K_p = 197$); matriță desen Pl-18085-21 ($K_p = 235$); matriță desen DFU-3-11021-17 ($K_p = 280$); poanson desen Pl-18085-21 ($K_p = 381$); matriță desen DFU-3-11021-15 ($K_p = 606$).

Se observă că prelucrarea prin eroziune electrică realizează reducerea costurilor C_{pc} cu 30...40% la $K_p > 100$ (curba b față de curba a), ceea ce corespunde întrutotul cu rezultatele cunoscute în literatură /37, 39, 67, 181, 213, 218, 239, 311, 314, 323, 358, 404/. Pe baza concluziilor de la capitolul 9 și a rezultatelor comunicate în literatură /126, 137, 191, 401, 404, 407/ se poate trasa estimativ curba 10.3 c, care reprezintă dependența

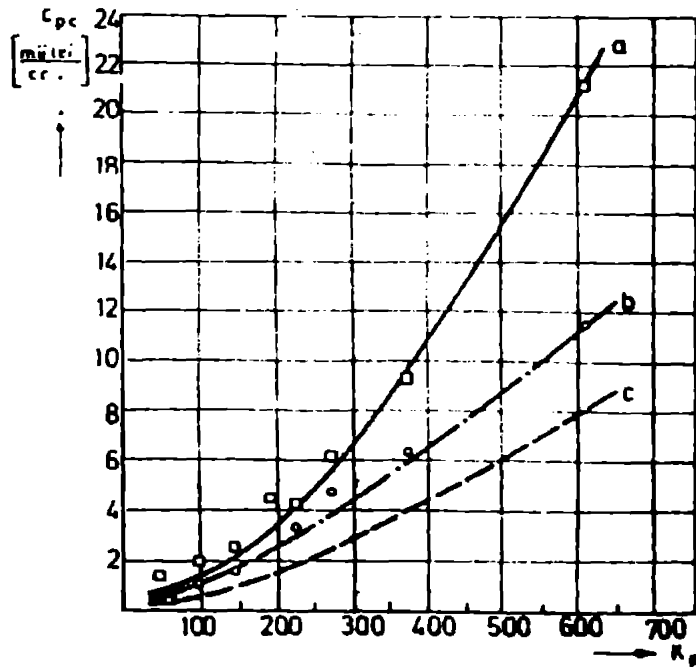


Fig.10.3. Dependența costului C_{pc} al prelucrării prin eroziune electrică a unei cavități de gradul de dificultate a prelucrării dimensionale K_p .

a) prelucrare prin așchiere; b) prelucrare de degroșare prin așchiere și prelucrare electroerozivă cu electrozi fabricați prin așchiere; c) idem, cu electrozi realizați prin galvanoplastie.

sonic. Pe baza concluziilor de la capitolul 9 și a rezultatelor comunicate în literatură /126, 137, 191, 401, 404, 407/ se poate trasa estimativ curba 10.3 c, care reprezintă dependența

$C_{pc} = f(K_p)$ pentru cazul de degroșării prin așchiere a cavității, urmată de prelucrarea prin eroziune electrică cu electrozi realizați prin galvanoplastie activată sonic.

Pe concluzie, rezultă că procedeul de fabricare prin galvanoplastie a electrozilor EP cu strat activ din

cupru, se poate aplica eficient la grade de dificultate a prelucrării dimensionale $K_p > 200$ și tehnologicitate corespunzătoare a formei și dimensiunilor suprafeței active a electrodului. Galvanoplastia activată sonic deplasează la valori $K_p > 100$ domeniul de aplicare eficientă a procedului.

Realizând economii de circa 30% la consumul de cupru pentru fabricarea unui electrod, galvanoplastia ar aduce anual pentru cazul utilajelor de prelucrare electroerozivă existente în Timișoara o economie anuală de 8.000...10.000 kg cupru, adică o valoare de 400...500 mii lei.

IV. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUTIILE ORIGINALE ALE LUCRĂRII.

Studiile și cercetările desfășurate în cadrul lucrării de doctorat permit formularea următoarelor concluzii generale :

1. Progresul tehnologiei construcției de mașini ca știință, creșterea performanțelor ei în practica industrială, inventarea unor noi metode și procedee tehnologice mai eficiente, impune aprofundarea cu hotărâre a abordării sistemice în cercetarea, proiectarea, fabricația, utilizarea sistemelor tehnologice la nivel de operație, caracterizate în prezent de creșterea deosebită a complexității.

2. Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului are în prezent cea mai mare pondere în aplicarea industrială a tehnologiilor de prelucrare prin eroziune, putând fi considerată deja o metodă clasică, din punctul de vedere al caracteristicilor utilajelor realizate. Se impune intensificarea cercetărilor teoretice și experimentale privind generarea suprafeței la piesă, astfel încât electrozii să poată fi proiectați și fabricați cu asistența calculatorului electronic numeric, cu consecințe deosebit de favorabile în creșterea productivității și a preciziei prelucrării.

3. La fabricarea industrială a electrozilor pentru prelucrarea prin eroziune se pot utiliza practic toate metodele și procedeele de prelucrare dimensională și de asamblare componente. În condițiile creșterii actuale a prețurilor materialelor și ale materialelor, energiei se impune însă selectarea fundamentată, riguros tehnic și economic a unui număr relativ redus de tehnologii de fabricare, în concordanță cu materialele disponibile comercial, asigurându-se consumuri specifice minime de materiale și energie, costuri minime cu electrozii pentru o cavitate prelucrată, în funcție de gradul de dificultate a generării suprafeței active a electrodului.

Principalele contribuții originale aduse în cadrul lucrării sînt următoarele :

A. În domeniul cercetării fundamentale și aplicative fundamentale - orientate :

1. Îmbunătățirea definiției unor concepte ale sistemelor generale :

- definirea corelată a conceptelor de bază ale teoriei generale a sistemelor, referitor la sisteme reale și sisteme concrete, cu considerarea unor aspecte substanțial-energetico-informaționale;

- evidențierea programelor de funcționare ca elemente informaționale de primă importanță în realizarea finalității respectiv obiectivelor sistemelor reale.

2. Dezvoltarea bazelor teoretice ale tehnologiei construcțiilor de mașini și în mod deosebit ale tehnologiei prelucrării dimensionale, prin cercetarea sistemelor de acțiune tehnologică la nivel de operație:

- elucidarea tipurilor de sisteme în tehnologie, a ierarhiei lor și a importanței sistemelor de acțiune tehnologică la nivel de operație (SATO);

- definirea componenței, funcției, obiectivului SATO și identificarea categoriilor de variabile pentru operațiile tehnologice de fabricare în construcția de mașini;

- elaborarea modelului structural și al modelului matematic general al SATO, definirea riguroasă a componentelor acestuia (mașină și aparat de fabricare, echipament de completare, dispozitiv, corp de transfer, mediu de lucru, spațiu de lucru, etc.), a legăturilor externe intrări (corpuri supuse lucrării, materiale de adaos, materiale de protecție, energie primară etc.), a legăturilor externe ieșiri (corpuri rezultat al lucrării, deșeurii tehnologice totalizate etc.);

- identificarea și studierea particularităților conexiunilor interne ale SATO (de interacțiune, de transformare, de conducere);

- definirea unor variabile de performanță pentru procesul de generare a suprafeței piesei și elaborarea relațiilor de calcul corespunzătoare; acestea permit determinarea mai riguroasă a gradului de complexitate analitică a suprafeței geometrice a piesei K_a , respectiv a gradului de dificultate a prelucrării dimensionale K_p a suprafeței reale a piesei - criterii de importanță deosebită în elaborarea deciziilor optime pentru tehnologia de prelucrare, și în final au fost utilizate concret la stabilirea domeniilor optime de aplicare a tehnologiilor de fabricare a electrodilor, dovedind o sensibilitate ridicată;

- analiza structurii spațiului de lucru al SATO din punct de vedere informațional și evidențierea subsistemelor componente ierarhice: spațiu de lucru elementar, spațiu de lucru microscopic;

- analiza determinării funcționale a structurii spațiului de lucru și stabilirea, pe această bază, a direcțiilor tehnologice posibile de a înlătura sau deplasa limitele metodelor convenționale (așchiere, separare cu tășuri asociate, deflorație plastică etc.): a) activarea proceselor la suprafața obiectului prelucrat; b) creșterea complexității structurale a corpului de transfer, care să fie compus dintr-un obiect de transfer și un mecanism și unul sau mai mulți agenți fizico-chimici (corp lichid, corp gazos, undă de șoc în fluid, câmp etc.) iar aceștia să asigure transmiterea energiei de efect la obiectul prelucrării la un nivel energetic oricât de înalt; c) transferarea în regiile de impuls a energiei de efect în interfața corp de transfer - obiect prelucrat; d) combinarea celor trei direcții menționate;

- analiza metodelor de prelucrare dimensională fără contact între obiectul de transfer și obiectul prelucrării, definierea riguroasă a metodei de prelucrare dimensională prin eroziune, elucidarea procesului de generare a suprafeței piesei și a structurii spațiului de lucru elementar tip plate și tip jet;

3. Dezvoltarea teoriei generale a generării suprafeței pentru prelucrarea dimensională fără contact și elaborarea unui model matematic precis al uzării electrodului la prelucrare prin eroziune electrică cu copierea formei;

- elucidarea principalelor grupe de procese fizico-chimice și a conexiunilor dintre acestea la prelucrare prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului;

- utilizarea unor concepte ale termodinamicii și a fenomenelor ireversibile pentru generalizarea teoriei generării suprafeței, deschizându-se căi utile în cercetarea și dezvoltarea unor noi metode și procedee de prelucrare dimensională;

- elaborarea pe această bază a unui model matematic general al generării suprafeței la obiectul prelucrat și la obiectul de transfer în cazul prelucrării dimensionale fără contact cu copierea formei;

- particularizarea modelului matematic general al prelucrării dimensionale prin eroziune electrică și elucidarea mecanismului macrogeometric al uzării electrodului de transfer; cercetările experimentale efectuate și cele conținute din literatura de specialitate au confirmat întrutotul corectitudinea mecanismului stabilit teoretic pentru prelucrare cu copierea formei, modelul matematic pentru eroziunea plăcii fiind verificat experimental cu o precizie de $\pm 4,5\%$.

B. In domeniul cercetării aplicative:

1. Cercetarea sistemului electrod de transfer pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei sub aspectele funcționale, ale caracterizării și influenței tehnico-economice a uzurii componentei active:

- identificarea funcțiilor electrodului de transfer a componentelor și clasificarea constructiv-funcțională a electrozilor entru prelucrarea prin eroziune electrică;

- definirea cu rigurozitate a uzurii electrodului, a durabilității și rezistenței la eroziune electrică a unui material electroconductor și precizarea condițiilor normative ale încercării la durabilitate electroerozivă;

- definirea mărimilor pentru caracterizarea macroscopică a uzării și uzurii electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, între care multe sînt noi;

- studiul preciziei dimensionale la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei și stabilirea pe cale teoretică a relațiilor de calcul a erorilor cauzate la piesă de către uzarea electrodului de transfer - problemă esențială a proiectării procesului tehnologic;

- determinarea analitică a influenței uzurii electrodului asupra costului electrozilor și stabilirea căilor de reducere a ponderei costului cu electrozii în costul prelucrării electroerozive a unei cavități: micșorarea uzurii relative liniare locale, selecția optimă a materialelor pentru electrozi.

2. Determinarea domeniului de aplicare optimă tehnico-economic a procedeelor de fabricare a electrozilor de transfer și stabilirea căilor de creștere a productivității, de reducere a costurilor cu electrozii pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei:

- studiul comparativ al procedeelor de fabricare a electrozilor pentru prelucrarea electroerozivă, elaborarea metodei de alegere optimă a materialului pentru electrozi și a procedeelor optime de fabricare a componentelor active ale electrozilor;

- determinarea, pe această bază, a materialelor și domeniilor optime de aplicare a procedeelor de fabricare a electrozilor pentru cazul secțiilor scolare și întreprinderilor mici și mijmii, în funcție de capacitatea de producție disponibilă la prelucrarea electroerozivă;

- determinarea pe cale analitică a sensibilității la variații

creștere a productivității prelucrării suprafeței active a electrozilor de transfer și evidențierea rezervelor încă neutilizate ale galvanoplastiei clasice, neactivate;

- determinarea analitică a influenței fabricării electrozilor asupra productivității și costului prelucrării electroerozive a unei cavități, cu evidențierea căilor de reducere a costurilor: utilizarea unor materiale cu durabilitate electroerozivă ridicată și costuri relativ reduse, durată redusă a fabricării electrodului, cotă minimă cu SDV-urile speciale pentru electrozi.

3. Cercetarea experimentală și determinarea condițiilor optime de activare sonică a depunerii electrolitice a cuprului pentru fabricarea mai productivă prin galvanoplastie a componentei active a electrodului de transfer;

- conceperea și realizarea unui echipament pentru galvanoplastie activată a cuprului, destinat fabricării electrozilor cu aria transversală pînă la $0,1 \text{ m}^2$;

- cercetarea experimentală a activării sonice a depunerii electrochimice a cuprului prin vibrarea electrolitului dintre electrozi și elaborarea unei metode noi, raționale, de determinare a frecvenței optime de vibrare;

- determinarea experimentală a frecvenței optime de activare sonică a depunerii electrochimice a cuprului în camera unei celule electrolitice de dimensiuni mici ($20 \times 20 \times 100 \text{ mm}$); la frecvențe de vibrare a electrolitului de 75 Hz viteza de depunere crește de 4...5 ori față de cazul neactivat, ceea ce lărgeste considerabil domeniul de aplicare eficientă a galvanoplastiei în fabricarea electrozilor;

- stabilirea domeniilor optime de aplicare în fabricarea electrozilor de volum 1 dm^3 a materialelor cupru, grafit, pseudo-aliaj Wolfram-cupru de diferite mărci și a prelucrării prin abraziere, galvanoplastie, abraziune orbitală; fabricarea prin galvanoplastie activată a electrozilor din cupru este eficientă, rapidă și economic la orice gabarit al electrozilor, în cazul prezentei de dificultate a prelucrării dimensionale $K_p > 100$ și al productivității corespunzătoare a suprafeței active a electrozilor, realizându-se economii de cca. 80 % la consumul specific de cupru.

C. Valorificarea rezultatelor cercetării s-a realizat prin aplicarea la întreprinderea electrochimică din Filiașeni, prin încheierea unui contract de cercetare /258/, a rezultatelor obținute.

partea II a lucrării, urmînd ca instalația pentru galvanoplastie activată să fie pusă în funcțiune în anul 1950 la Secția de prototipuri și microproducție a Institutului politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, pentru a satisface nevoile de fabricare a electrozilor necesari în procesul de producție al secției, sau pentru alte întreprinderi.

V. LITERATURA

1. x x x Programul Partidului Comunist Român de făurire a societății socialiste multilateral dezvoltate și înaintarea României spre comunism, București, Editura politică, 1975
2. x x x Programul-directivă de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului tehnologic în perioada 1981-1990 și direcțiile principale până în anul 2000, București, Editura politică, 1980
3. x x x Directivele Congresului al XII-lea al Partidului Comunist Român cu privire la dezvoltarea economico-socială a României în cincinalul 1981-1985 și orientările de perspectivă până în anul 1990, București, Editura politică, 1980
4. Acerkan N.S. ș.a. : Metallorejuzie stanki, tom 1, Moscva, Izd. Mašinostroenie, 1965
5. Achimescu N., Popa H. : Distribuția vitezelor de uzare a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, lucrare comunicată la Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1971
6. Achimescu N., Popa H. : Influența factorilor geometrici asupra uzării electrodului la prelucrarea electroerozivă cu copierea formei, în Buletinul științific și tehnic al IITV, seria mecanică, tom 17(31), fascicula 2, Timișoara, 1972, p. 21-8
7. Achimescu N., Popa H. : Studiul comportării la eroziune electrică a electrozilor confecționați din material compozit Cu95C5, contract de cercetare științifică IITV Timișoara-CNST București, Timișoara 1973
8. Achimescu N., Popa H. : Studiul generării suprafeței la prelucrarea prin eroziune electrică în condiții de evacuare instantanee a materialului excedentar, sau tipar, în Buletinul științific și tehnic al IITV, seria mecanică, tom 17(37), fascicula 1, Timișoara, 1980
9. Ackoff R.L., Sasieni M.S. : Bazele cercetării operaționale, București, Editura tehnică, 1975
10. Ackoff R.L. : Toward a System of System Concepts, Management Science, vol. 17, nr. 11, 1971, p. 801-811
11. Alexseenko V.F. : Oblasti effektivnoe impolnovaniia metodov proşivki i virezki pri ingotovlenii zavodnogo prototipa, în Impulsnie metodî obrabotki materialov, Minsk, VUZ. Nauka i tehnika, 1977, p. 165-171
12. Altin L. : A systemic approach in manufacturing technology, în Develop. Prod. Syst. Proc. 2-nd Int. Conf., Copenhagen, 1973, London, 1974
13. Antonescu I. ș.a. : Sudarea prin presiune, București, Editura tehnică, 1965
14. Arzenskii A.V. ș.a. : Sovremennii droveni razvitiia elektroerozionnoi i elektrohimiceskoi obrabotki materialov za rubejom, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr. 4, M. Lening, 1971, p. 83-89
15. Arzenskii A.V. ș.a. : Osnovnye napravleniia razvitiia elektriceskikh metodov obrabotki za rubejom, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr. 4, M. Lening, 1975, p. 87-91

16. Arnoldi N.M., Levit M.L. : Nekotore osobennosti elektroerozionnoi obrabotki uglerografitovih elektrodami-instrumentami, în Elektrofiziceskie i elektroniceskie metode obrabotki materialov, nr.1, Moskva, 1978, p.78-88
17. Aronov A.I. : Oproščessah obrazovanija uglerodistih nagestv pri elektroimpulisnoi obrabotke instrumentami iz profirovannovo materiala, în Elektroimpulisni i elektrokontaktnii sposobi obrabotki metallov, vypusk 11, Moskva, 1982, p.62-91
18. Astahov I.V. ș.a. : Elektroerozionnîe kopirovaniia-privodcinie stanki normalnoi točnosti, în Stanki i instrument, nr.9, Moskva, 1977, p.9-12
19. Astrop A.W. : Reduced EDM electrode wear, în Machinery and Production Engineering, nr.3295, 1976, p.117
20. Atanasiu I.A., Facsko Gh. : Electrochimie. Principii teoretice Editura tehnică, București, 1958
21. Avram I. : Stadiul actual al aplicării tehnologiilor neconvenționale în construcția de mașini, lucrare comunicată la Conferința națională de tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, 1971
22. Avseevici O.I. : Issledovanie erozionnoi stoikosti metallokeramiceskih materialov na osnove mekhanice porodka s odnima dobavkami, în Impulisnîe metode obrabotki materialov, Minsk, Izd. Nauka i tehnika, 1977, p.184-187
23. Avseevici O.I. : Issledovanie erozionnoi stoikosti metallokeramiceskih elektrodov s aktivnima dobavkami, Impulisnîe metode obrabotki materialov, Minsk, Nauka i tehnika, 1977, p.189-194
24. Bakuto I.A. ș.a. : Sviazi formi elektroda-instrumenta s formoi polosti, obrazujuščiesia pri elektroerozionnoi obrabotke, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr.2, Minsk, 1974, p.5-6
25. Bakuto I.A. : O vozmojnov vliianii sostavlenia mejalitrodnovo promejutka na proçess elektroerozionnoi obrabotki, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr.1, Minsk, 1973, p.12-15
26. Balabanov S.K. : Modelirovanie i optimizacija v avtomatizirovannih sistemah upravlenija, Moskva, Atomizdat, 1977
27. Balleys F. ș.a. : Etude de la distribution spatiale des charges en électroérosion, în C.R.A.S., nr.1, 1973
28. Balleys F. : Isotropische Bearbeitung, în Fertigungstechnik, 1978, p.59-63
29. Bartajev L.V. : Tehniko-ekonomiceskie porcioti pri proizvodvanie i proizvodstv. mašin, Moskva. Mashinostroenie, 1973
30. Baron T. : Calitatea și fiabilitatea produselor, București, Editura didactică și pedagogică, 1977
31. Barz S. : Technologische Grundlagen für die Optimierung des funkenerosiven Senken, în Industrie Anzeiger, nr.36, 1976, p.1955-1959
32. Bauer D. : Herstellung von Kupferelektroden für die funken-erodierende Bearbeitung von Werkstoffen durch hochfrequenz-induktivis-lechumformung, în Industrie Anzeiger, nr.37, 1976, p.2005-2008

33. Bauer A.E. : Galvanoforschung mit Nickel, in Technik, nr.1, 1975, p.23-24
34. Belikevici B., Timashev V. : Spravochnik posobie tehnologa mashinostroitelinovo zavoda, Minsk, Izd. Belarusi, 1971.
35. Belkin G.S. : Vliianie teplofizicheskikh svoistv materiala kontaktov na velikinu elektricheskoi erozii, in Elektrichestvo, nr.2, Moskva, 1970, p.86-88
36. Belousov A.P. ș.a. : Avtomatizatsiia professov v mashinostroenii, Moskva, Vissiaia șkola, 1973
37. Bender F.K. : Funkenerosionstechnik beeinflusst Raumformgestaltung von Werkzeugen, in Werkstatt und Betrieb, nr.1, 1966, p.785-792
38. Bender F.K. : Funkenerodieren von Schmiedegesenken, Extrudatrützen, Warmpress- und Druckgussformen, in Werkstatt und Betrieb, nr.12, 1966, p.853-855
39. Bender F.K. : Einfluss der Funkenerosion auf den Formenbau, in Werkstatt und Betrieb, nr. 10, 1970, p.797-799
40. Bender F.K., Paul D. : Wirtschaftlichkeitsfragen der Funkenerosiven Raumbearbeitung, in IAS 3, Wien, 1970
41. Bertalanffy L. : General System Theory. Foundations, Development, Applications, New York, George Braziller, Inc., 1966
42. Birlea S. : Inițiere în cibernetica sistemelor industriale, București, Editura tehnică, 1975
43. Blauger I.I. ș.a. : Abordarea sistemelor în știința contemporană, în Metoda cercetării sistemelor, București, Editura științifică, 1974, p.9-52
44. Boldur Gh. : Procese informaționale și decizie, București, Editura științifică, 1969
45. Boldur Gh. : Fundamentarea complexă a procesului decizional economic, București, Editura științifică, 1973
46. Botez E. : Bazele generării suprafețelor pe mașini CNC, București, Editura tehnică, 1986
47. Buslenko K.P. ș.a. : Lekții po teorii rețan sistem, Moskva, Sovetskoe radio, 1973
48. Buzdugan Gh. ș.a. : Vibrațiile sistemelor mecanice, București, Editura Academiei RSR, 1975
49. Buzdugan Gh. ș.a. : Măsurarea vibrațiilor, București, Editura Academiei RSR, 1979
50. Carțig I. : Cercetări teoretice și experimentale asupra structurii, proprietăților, dinamicii și rezistenței la vibrații a țelurilor prelucrate prin eroziune electrică, teză de doctorat, IPTV Timișoara, 1975
51. Călin S., Belea C. : Sisteme automate adaptive și robuste, București, Editura tehnică, 1971
52. Călin S., Belea C. : Sisteme automate robuste, in Automatizări, Editura tehnică, 1975
53. Călinescu V. : Tendințe în prelucrarea metalelor pe mașini unelte agregate și linii automate, București, Editura tehnică, 1975
54. Carnek I. : Producția electronilor-negativi prin eroziune electrică cu scînteie electrică, in prelucrarea metalelor, Automatizări, nr. 14, București, 1967, p. 38-41

55. Chiriță V. ș.a. : Matrițarea la cald a metalelor, București, Editura tehnică, 1968
56. Churchman C.W. : The Systems Approach, New York, McGraw-Hill Publishing Com., Inc., 1968
57. Constantinescu P., Negoită C.V. : Sistemele informatice, modele ale conducerii și sistemelor conduse, București, Editura tehnică, 1975
58. Crawley H.J. : The economics of electrical discharge machining, în ISM 3, Wien, 1970
59. Crăciunescu V. ș.a. : Organizarea întreprinderilor industriale. Proiectarea întreprinderilor și produselor, vol. 1, Timișoara, Tipografia Universității Timișoara, 1974
60. Crișan I., Dobre R. : Automatizarea montajului în construcția de mașini, București, Editura tehnică, 1979
61. Crișan I. ș.a. : Prognoza industriei construcțiilor de mașini, în Economia mondială: Orizont 2000, București, Editura Academiei RSR, 1980, p.177-227
62. Crookall J.R., Heuvelman C.J. : Electro-discharge machining - the state of the art, în CIRP, nr.2, 1971, p.113-118
63. Crookall J.R., Fereday J.R. : Une détermination expérimentale de la dégradation de la forme de l'électrode-outil dans l'usinage par électro-érosion, în Microtechnic, nr. 1, 1973, p.97-98 și p.197-200
64. Crookall J.R., Moncrieff A.J.R. : A theory and evaluation of tool-electrode shape degeneration in electro-discharge machining, în Proc. Instn. Mech. Engrs., n.6, 1971, p.1-11
65. Crookall J.R. : Electro-discharge machining - the present and the future, în Eng. Dig., nr.9, 1971, p.43-45
66. Crookall J.R. : An Analysis of SDA Utilization in Precision Tooling Manufacture, în CIRP, nr.1, 1973, p.11
67. Crookall J.R. : SDA in practice - its mechanical and economic utilisation, în Eng. Dig., nr.12, 1973, p.25-27
68. Danilevskii V.V. : Tehnologiile mașin utroenii, Moscova, Vissiaia șkola, 1972
69. Decker G. : Tehnologie de fabricare și execuție ecologică pentru galvanoplastie cu activare sonică, proiect de diplomă condus de ș.l. ing. Popa Maria, Timișoara, Facultatea de mecanică, 1979
70. Degenhardt H., Zolotia D.N. : Tehnologhia SDA în EMO și EEO, Bratislava, 1973
71. Delsalle B. : Les développements de l'électroformage, în Galvano-Organo, nr.440, 1974, p.341-349
72. Demianiuk F.S. : Bazele tehnologice ale producției mecanice și automatizate, București, Editura tehnică, 1974
73. Dini J.W., Johnson H.R. : Separating Large Thin Flange Formed Parts from Mandrels, în Metal Finishing, nr. 1, 1974, p.52-55
74. Dixon R.J. : Design Engineering: Inventiveness, Analysis and Decision making, New York, McGraw-Hill Book Company, 1966
75. Domșa A. ș.a. : Tehnologiile fabricării plăcilor din metale metalice, București, Editura tehnică, 1968

76. Drăgănescu M. : Societatea ca sistem, în Știința conducerii societății, București, Editura politică, 1971, p.67
77. Drăghici G. : Tehnologia construcțiilor de mașini, București, Editura didactică și pedagogică, 1977
78. Dreucean A. ș.a. : Lichide de lucru pentru prelucrare a metalelor prin electroeroziune, invenția nr.54073, înregistrată 1968, București, editura tehnică, 1972
79. Drimer D. : Prognoza asupra unor evenimente caracteristice privind domeniul prelucrării metalelor, în Buletinul de informare tehnico-economică, nr.1, București, MICA, 1972
80. Drimer D. : Flexibilitatea în gândire și acțiune pentru suplimentarea progresului tehnologic, în Era socialistă, nr.12, 1978, p.41-43
81. Drimer D., Calea Gh. : Tehnologie mecanică, București, editura didactică și pedagogică, 1978
82. Drujinin V.V., Kontorov D.S. : Problemi sistemologhii, Moskva, Sovetskoe radio, 1976
83. Dubbel H. : Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin-Hinsberg-New York, 1974
84. Duca Z. : Bazele teoretice ale prelucrărilor pe mașini unelte București, editura didactică și pedagogică, 1967
85. Dumitrescu D. : Aspecte ale prelucrării și montajului metalelor, în Standardizarea, București, nr.1, 1968, p.1-4
86. Dumitrescu S. ș.a. : Aplicații în tehnologia mașinilor unelte, vol.3, București, editura didactică și pedagogică, 1977
87. Dumpe V.E. : Povișenie universalnosti elektroerozionnogo obrabotki, în Elektronnaia obrabotka metalov, nr.3, 1975, p.66-70
88. Dumpe V.E. : Elektroerozionnaja obrabotka detaliei, Tehnika, 1975
89. Elmaghaby S.E. : Proiectarea sistemelor de comandă, București, Editura tehnică, 1968
90. Emerson C. : SDA for high output, în IBM J. Res. Dev., nr.10, p.62-64
91. Emery F.E. : System Thinking, Norman, Perkin-Elmer Inc. Ltd, 1969
92. Enache S. : Calitatea suprafețelor prelucrate, București, Editura tehnică, 1966
93. Ene H. : Teoria reglării sistemelor de comandă, București, editura Academiei RSR, 1972
94. Engels K. : Optimierregelung für das Laserschneiden, în VDI-Z, nr.8, 1970, p.165-170
95. Etin A.O. : Vîbtor optimalinii uslovii pri reșenii zadacheskikh zadaci, în Stanki i instrumenti, nr.3, 1968, p.1-4
96. Ersoy M. : Konstruktionskatalog für rechteckige Werkstatttechnik, nr.4, 1970, p.118-119
97. Facsko G., Radoi I. : Procedeu de îndalățare a suprafețelor electrolitice a metalelor, invenția nr.54073, înregistrată 1968, București, editura tehnică, 1972
98. Facsko G. : Tehnologie electrochimică, București, editura tehnică, 1969

99. Pacsko G. : Cours de electrochimie et corrosion, Paris, 1971, Facultatea de tehnologie chimica, 1971
100. Fedin A. P. : Svarka, naplavka i rezka metalov, Moscova, Vîșeișiaia șkola, 1972
101. Fedotenok A.A. : Kinematicnaia struktura metalov na mașin stankov, Mașinostroenie, 1970
102. Fishburn P.C. : Decision and Value Theory, New York, John Wiley, 1964
103. Florea V. ș.a. : Procedeu de electrozare a electrozilor pentru mașinile de prelucrat prin electroeroziune, invenția nr. 54946, înregistrată 1971, București, Editura tehnică, 1972
104. Florescu I. : Progrese în tehnica în procedeele electroeroziionale de prelucrare a metalelor, Lucurești, 1973
105. Forrester J.W. : Principles of systems, MIT Press, Cambridge SUA, 1973
106. Foteev N.K. : Elektroeroziionnaia obrabotka glubokih cilindričeskih otverstii, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr.3, Kiginev, 1970, p.9-15
107. Franke H.J. : Beitrag zur Fertigung von Kupferelektroden durch Funkenentladung unter Wasser, Dissertation, Technische Universität Hannover, 1972
108. Frolov V.K. : Spособi umeniženija iznosnogo elektronnogo instrumenta pri elektroiskrovoi obrabotke konoprovodimyh materialov, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr.3, Kiginev, 1974, p.5-8
109. Gamrat Aurek L.I. ș.a. : Vibor varianty ingotovlenija izdelii i koeffițienti zatrat, Moscova, Mașinostroenie, 1968
110. Gavrilaş I. ș.a. : Proiectări electrice în construcția de mașini, București, Editura tehnică, 1966
111. Gavrilă I., Iliuțeanu I. : Accelerația instrumentelor eroziive a metalelor cu ajutorul ultrasunetelor, în Construcția de mașini, nr.3, 1974, p.74-77
112. Gîdea S., Protopopescu M. : Aliaje năferose, București, Editura tehnică, 1969
113. Ghevorkian G.G. : Elektropulishnaia obrabotka pri formirovani instrumentalnogo osnustai, în Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov, Moscova, 1966, p.77-88
114. Ghevorkian G.G. : K voprosu ob iznosnogo elektrode-instrumenta pri elektropulishnoe obrabotke, în Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov, Moscova, 1966, p.77-79
115. Ghevorkian G.G. : Experimentálnoe issledovanie kavitatsionno-évakuat. produktov erozii i ego vliianie na profilnostelinosť i točnosť elektroeroziionnoi obrabotki, referat disertații, Moscova, 1967
116. Ghevorkian G.G. : Dinamika izmenenii topki pri obrabotke instrumenta pri elektropulishnoi obrabotke, în Elektrofizicheskie i elektronimicheskie metody obrabotki, nr.3, Moscova, 1968, p.13-14

117. Ghinberg A.M. : Ultrazvuk v obrabotke i elektrodnoy
professan mašinostroeniia, Moskva, Mashin, 1977
118. Ghinberg A.M., Sedotova N.I. : Ultrazvuk v obrabotke
Moskva, Izd. Metallurgiya, 1979
119. Ghizdavu V. : Prelucrarea metalicelor cu puteri
București, Editura tehnica, 1987
120. Glazov G.A. : Kompleksnaia mašinitaiia i avtomatizatsiia v
melkoseriinom proizvodstve, Leningrad, Mashinostroi, 1972
121. Glayman J., Farkas G. : Aide-mémoire de génie électrique, Paris
Editions Eyrolles, 1967
122. Golu M. : Cibernetica generala, Bucuresti, Centrul de Multi-
plicare al Universității, 1971
123. Golumbioschi I. : Industrii electrice chimice și electronice, ma-
nual de lucrări practice, Timișoara, RTV Timișoara, 1977
124. Goranskii G.K. : Elementi teorii avtomatizaii mašinostroi-
telinovo proektirovaniia s pomogciia vicislitelnoi tekni-
ki, Minsk, Izd. Nauka i tehnika, 1970
125. Gorbatevici A.F. ș.a. : Kursovoe proektirovanie po tekno-
logii mašinostroeniia, Minsk, Izd. Vapeizdaia 1987, 1975
126. Gorskii V.A. ș.a. : Tehnologicheskie preysa i otortsevanie
dlia elektroeroziionnoi obrabotki kuznitskoi valiloi, in
Elektrofiziceskie i elektrodnoe stroenie, sb. 1975,
nr.2, Moskva, 1975, p.1-6
127. Gough P.J. : Advances in die casting, in Metals
nr.5, 1979, p.319-321
128. Gönler H. : Beitrag zur Lösung des Verschleißproblems bei
der funkenerosiven Metallbearbeitung, in ATW Internationales
Wissenschaftliches Kolloquium, Essen, Band 1, 1979,
p.61-65
129. Grabowski R., Türschmann V. : Elektroerodierendes Str,
in Fertigungstechnik und Betrieb, nr.9, 1976, p.10-15
130. Grigorieva N.S. : Seminar "Elektrofiziceskie i elektrodno-
ceskie metodi obrabotki materialov", in Stanok i Instru-
ment, nr.6, Moskva, 1975, p.43-44
131. Gruber W., Marguis D.G. : Factors in the transfer of techno-
logy, in the MIT Press, Cambridge, MA, 1968
132. Gründe W. : Nutzung der Galvanofornung zum Herstellen
von Spritz- und Pressformen für Kunststoffteile, in Kon-
dation. Spektrotechn., elektron., nr.1, 1976, p.13
133. Gutkin B.S. : Avtomatizaiia elektrodnoionnoi stanki,
Leningrad, Izd. Mašinostroenie, 1971
134. Gutstein A.I. : Cibernetica și reglarea economică produc-
ției, București, editura științifică, 1974
135. Gütner H. : Abtragende Fertigungungsverfahren, in VDI-Z für
Maschinenmarkt, nr. 22, 1976, p.22-23
136. Haas E. : Kopierfräsen im Vergleich zum Funkenere-
Werkstatt und Betrieb, nr. 1, 1976, p. 17-18
137. Haas E. : Grosse Galvanofornen im Spritz- und Pressen,
in Werkstatt und Betrieb, nr. 1, 1976, p. 13-14
138. Haase R. : Thermodynamik der industriellen Erzeugung, Wera-
stadt, Dietrich Steinhilpert Verlag, 1967

139. Hansen K. : Konstruktionswissenschaft. Grundlagen und Methoden, Berlin, VEB Verlag Technik, 1974
140. Harris C.M., Crede C.E. : Securi și vibrații, vol.1-2, București, Editura tehnică, 1963-1969
141. Hartmann J., Wilde E. : Methode Grenzkomplimenten, in Fertigungstechnik und Betrieb, nr.11, 1974, p.55-6
142. Hegedüs A. : Proiectarea, realizarea și încercarea unor vibratoare electrodinamice, in Vibrații în construcțiile de mașini, Timișoara, 1978, p.237-245
143. Hegedüs A. : Notița tehnică a produsului vibrator electrodinamic VED 1, SPM, IPTV Timișoara, 1978
144. Heitz E. : Herstellung von Umformellen, in Kunststofftechnik, nr.2, 1971, p.37-40
145. Heitz E. : Kopiernegative für den Werkzeugbau, in Kunststofftechnik, nr.3, 1971, p.102-109
146. Hemon Y. : Progrès dans l'usinage par étincelage, in Rondeur Aujourd'hui, nr.215, 1970, p.5-8
147. Hentrich R. : Herstellen von Kunststoff-Verarbeitungswerkzeugen durch Galvanoformen, in Kunststoffe, nr.4, 1972, p.211
148. Heuvelmann C.J., Horn B.L. : Review of cooperative work on EDM in STCE of CIRP, in Cirp, nr.2, 1971, p.203-217
149. Hilbert L.H. : Erodieren, in Werkstatt und Betrieb, nr.3, 1972, p.163-173
150. Hinde J. : Galvanoformen mit Nickel mit Laser, in Produktion nr.11, 1972, p.70-74
151. Hofstede A. : Results of C.I.R.P. Group 5 Standard EDM on S.M., Delft, Centrum voor Metalbewerking, 1968
152. Hoffman R., Rosba H. : Grundlagen der Genauigkeitsbearbeitung mit NC-gesteuerten EDM-Maschine, in Feinwerkstechnik, nr.10, 1972, p.455-459
153. Iampolskii A.M. : Kontroli kachestva i celnitsa per. 211, Izd. Mašinostroenie, Moskva, 1968
154. Iașin P.S. : Vliianie materialov i strokov na pr. irosti, in Tehnol. elektr. metodov obr. tsi, Kozak, 1971, p.69-70
155. Iosino L. ș.a. : Dispozitiv pentru eliminarea excesului de muchie la depunerea acoperițiilor galvanice, Invent. de invenția nr.47-58800, înregistrată 1973, publicată în...
156. Isarie I. : Cercetari privind procesarea prin metoda electrică în condiții de supraalimentare, teza de doctorat, IPTV Timișoara, 1973
157. Iuculescu I. ș.a. : Sistemul internațional de măsură (SI), editura tehnică, București, 1970
158. Johnson R. ș.a. : Théorie, conception et réalisation d'un mecu, Paris, Dunod, 1970
159. Kafarov V.V. : Metodi kibernetiki i teorii i tehnologii, Moskva, Izd. MFTI, 1971
160. Kafarov V.V. : Méthodes cybernétiques et technologies, Moscou, Edition Mir, 1974
161. Kafarov V.V. ș.a. : Prinzipi i metode kibernetiki i tehnologii himiko-tehnologičeskikh sistem, Moskva, Mir, 1971

162. Kaldos F. : Szikráforgácsoló elektródok méretezésének alapvető problémája, in Elektroeróziós mechanikai gépészet, Budapest, 1972, p.44-67
163. Kalinin A.M., Kamsiuk M.S. : Nekatorie zakonomernosti iznosa elektrodov-instrumentov pri elektroerozionnoi obrabotke, in IVUZ Mashinostroenie, nr.1, Moskva, 1970, p.14-19
164. Kalinin M.A., Kamsiuk M.S. : Osnovnye printipy opredeleniya sumarnoi pogresnosti elektroerozionnoi obrabotki pri ustoychivom rezhime, in IVUZ Mashinostroenie, nr.7, Moskva, 1972
165. Kalman R.E. ș.a. : Topics in Mathematical System Theory, New York, McGraw-Hill, 1969
166. Kamsiuk M.S. : Orazmernom iznose elektrodov pri elektroerozionnoi obrabotke, in IVUZ Mashinostroenie, nr.11, Moskva, 1966, p.168-172
167. Kandaian S.G. : Vysokoproizvoditelnoi stanok dlia seriinovo izgotovleniia elektrodov v elektroerozionnih stankam, in Stanki i instrument, nr.12, Moskva, 1968, p.12-13
168. Kanishi M. : Influența stării lichidului de lucru asupra condițiilor prelucrării electroerozive, in Res. bull. Hiroshima Inst. Technol., nr.9, 1974, p.123-139
169. Kapustin M.M. : Uskorenie tehnologiceskoi podgotovki kadranosborocinovo proizvodstva, Moskva, Mashinostroenie, 1972
170. Kato D. : Sistem pentru conducere program numeric a mașinile de prelucrare electroeroziva, in Ciohănița nr.1, nr.5, 1974, p.86-97
171. Kinoshita N. : Dezvoltarea prelucrării electroerozive, in Ciohănița nr.1, nr.11, 1975, p.12-14
172. Kiomidzu T. : Galvanoplastica, in Mec. Ing., nr.3, 1975, p.80-81
173. Klegciuk S.E. : Dostijeniia i tendencii razvitiia elektroerozionnoi elektriceskoi razmernoi obrabotki metallov na raznykh rezhimakh, in Elektronnaia obrabotka materialov, nr.9, Kijiv, 1975, p.26-30
174. Kohanovskaia T.S. : Opredelenie mejelektrodovogo razmerna dlia zadannih uslovii elektroerozionnoi obrabotki, in Elektrofiziceskie i elektrohimiceskie metody obrabotki materialov, Moskva, 1973, p.1-8
175. Korocikin P.E., Kraveț A.F. : Elektroerozionnaia obrabotka s orbitalnim dvijeniem, in Stanki i instrument, nr.12, Moskva, 1977, p.26-27
176. Korenblium M.V. ș.a. : Elektroerozionnaia obrabotka instrumentom iz metallokeramiceskoi kompozicii, in Stanki i instrument, nr.2, Moskva, 1977, p.30-31
177. Korenblium M.V. : Rasčet parametrov zaplavy pri elektroerozionnoi obrabotke, in Stanki i instrument, nr.12, Moskva, 1975, p.32-33
178. Korenblium M.V., Vinnik V.A. : Vysokoskvoznaia elektroerozionnaia obrabotka, in Stanki i instrument, nr.12, Moskva, 1977, p.19-20
179. Kotarbinski T. : Tratat despre mecanica fluidelor, Editura politică, 1970
180. Kovalenko V.S. : Elektrofiziceskie i elektrohimiceskie metody obrabotki materialov, Kiev, Inst. fiz. i khim. Akad. Nauk Ukr. SSR, 1975

181. Köhn R. : Funkenerodieren von Werkstücken und Werkstoffen, in Werkstatt und Betrieb, nr.3, 1967, p.111-112
182. König-Georgescu L., Dimitriu N. : Tehnologiile de fabricare a electrozilor pentru electroeroziune, in Constr. Ind. de Masini, nr.2-3, 1977, p.121-125
183. König W. ș.a. : Funkenerosive Mehrkanalbearbeitung, in ClAP, nr.1, 1973, p.57-58
184. König W., Kurr R. : Recenti sviluppi nel campo dell' elettroerosione, in Mecc. ital., nr. 71, 1974, p.3-14
185. König W. ș.a. : Material removal and energy distribution in electrical discharge machining, in ClAP, nr.1, 1976, p.95-100
186. König W. ș.a. : The Flow Fields in the Working gap of an Electro-Discharge-Machining, in ClAP, nr.1, 1977, p.71-77
187. König W., Epping H. : Verschleissminderung durch adaptive Regelung beim funkenerosiven Senken, in Industrie Anzeiger nr.55, 1979, p.19-21
188. König W., Jutzler W.J. : Technologie des funkenerosiven Senkens mit Graphit-Elektroden, in Industrie-Anzeiger, nr.55, 1979, p. 27-29
189. Kracht E.W., Kurr R. : Möglichkeiten zur selbsttätigen Optimierung des Erosionsprozesses, in Industrie-Anzeiger, nr.29, 1971, p.499-501
190. Krampitz R., Heymann D. : Stand und Entwicklungstendenzen der funkenerosiven Materialbearbeitung, in Werkstatt, nr.3, 1975, p.487-490
191. Kraveț A.T. : Izgotovlenie elektroerodionnykh i elektroerozionnoi obrabotki, in Novoe v elektromekhanike i elektrohimiceskoi obrabotke materialov, Lenin. V. Izd. Mašinostroenie, 1972, p.166-169
192. Kraveț A.T. : Obrabotka na elektroerozionnih kopirovannoprocirovocinih stankah, in Stanki i instrument, nr. 1, Moskva, 1977, p.12-14
193. Kretzschmar E. : Metall-, Keramik- und Plastikspritzen, Berlin, VEB Verlag, 1962
194. Kubota M. : Starea actuala a prelucrării dimensiunilor electrice, in Mikai no Kenkiu, nr.7, 1975, p.819-824
195. Kucin V.D. : Ob opredelenii elektroerozionnoi ustalivosti tvordih tel, in Elektronnaia struktura materialov, nr.4, Kișinev, 1969, p.16-18
196. Kudinov V.A. : Linia de mașinilor unelte, București, Editura tehnică, 1970
197. Kurr R. ș.a. : Die Auswirkung der Kraftverteilung auf Abtrag und Verschleiss bei der funkenerosiven Bearbeitung, in Industrie-Anzeiger, nr.31, 1973, p.622-625
198. Kurr R., Larz E. : Adaptive Control-systeme für die funkenerosion, in VDI-Z, nr.10, 1973, p.602-605
199. Lazarenko L.R., Lazarenko M.I. : Avtomatizirovanie obrabotki SSSR, No.70010, 1943
200. Lazarenko L.R., Lazarenko M.I. : Vvedeniia k mašinostroeniui, Bratislava, Izdat. 1, 1964
201. Lăzărescu I. ș.a. : Toleranțe și măsurări tehnice, București, Editura didactică și pedagogică, 1969
202. Ledrund Rupert : Sculpturina și electrozile, in Industria Mașinist, nr.16, 1970, p.75

203. Leonova V.S. : Termodinamika, Moskva, Vysşie učebn. kn. 1966
204. Lepetit P. : L'electroformage, în *Annuaire de l'industrie*, nr. 1, 1974, p.6-10
205. Levinson E.M. : Elektrorazriadnii obrabotka materialov, Leningrad, Maşinostroenie, 1971
206. Levinson E.M. : Spravochnik posobie po elektrotokovym pul'sam, Leningrad, Maşinostroenie, 1972
207. Levit M.L., Padalko O.V. : Russiet polin elektrodov-instrumentov dlia elektroerozionnoi obrabotki, în *Stanki i instrument*, nr.5, Moskva, 1976, p.11-14
208. Levit M.L., Padalko O.V. : Druviteiinae karakteristiki elektrodov-instrumentov iz poristoi masli i drugikh sredstv, în *Stanki i instrument*, nr.9, Moskva, 1977, p.10-11
209. Levy G.N. ş.a. : Technological and economical Aspects of planetary Spark Erosion, în *IEEM 5 Proceeding*, Zürich, Juris-Verlag, 1977, p.165-170
210. Levy G.N. : Some modern aspects of tool and die manufacturing with EDM, în *Tool and Dies Ind. Proc. Conf. Birmingham 1976*, London, 1977, p.397-408
211. Livşitş A.L. ş.a. : Iznoc elektrodov-instrumentov iz rafitirovannovo materiala pri elektroimpul'snoi obrabotke materialov, în *Stanki i instrument*, nr.7, Moskva, 1976, p.11-12
212. Livşitş A.L. : Metodika poiska novin pri razrabotke i razvitiia, în *Vestnik maşinostroeniia*, Moskva, nr.9, 1976, p.80
213. Livşitş A.L. ş.a. : Elektroimpul'snaia obrabotka, Moskva, Maşinostroenie, 1967
214. Livşitş A.L. ş.a. : Generatori impul'sov, Moskva, Maşinostroenie, 1970
215. Livşitş A.L. ş.a. : Karakteristiki majorentnykh parametrov, în *Elektrofiziceskie i elektronicheskie metody obrabotki*, nr.5, Moskva, 1971, p.1-7
216. Livşitş A.L. : Naucino-techniceskie napravleniia razvitiia elektrofiziceskikh i elektronicheskikh metodov razrabotki i obrabotki, în *IEEM 1*, Bratislava, 1974
217. Livşitş A.L. : Fiziceskie modeli protessa otivnoi elektroerozionnoi obrabotki, în *Stanki i instrument*, nr.1, Moskva, 1976, p.4-8
218. Lobanov A.V. : Elektropul'snnaia obrabotka novocinnokh stam-pov, în *Ruznecino-stampovocinee proizvodstvo*, nr.1, Moskva, 1971, p.43-45
219. Loeffel E. : How to die with an electrode, în *Die and Stamp*, nr.30, 1977
220. London A. : Electroformed and die casting, în *Electronics Engineer*, nr.628, 1971, p.3-4
221. Lupescu I. ş.a. : Studiu asupra stratului de oxidare în zona zgurii şi în medii protectoare, Bucureşti, Editura Tehnică, 1966
222. Mai E. : Normales Beschreibungs-system der abnormen Geometrien und zur moderneren Darstellung der technischen Einzelteilzeichnungen, Berlin, Springer-Verlag, 1969
223. Maillet M. : Prelucrarea totală prin electroeroziune, în *Technique et Science*, Paris, nr.1, 1965, p.145-155

224. Malița M. : Arta sau știința conducerii, în *Arta și Știința Conducerii*, vol.1, Cluj, Editura Măcia, 1971, p.17-22
225. Malița M. : Teoria sistemelor și unitatea științelor, evoluția socialistă și revoluția științifică-tehnologică, Editura politică, 1975, p.10-1
226. Malîșkin V.K. : Progressivnii metody podgotovleniia instrumentov dlia elektroeroziionnoi obrabotki, *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta obrabotki materialov*, Minsk, 1977, p.181-184
227. Malkin A.I. : Osnovi tehnologii mekhanicheskoi obrabotki detalei mașin, Moskva, Mașin, 1961
228. Malov A.N., Ivanov I.V. : Osnovi avtomatiki i avtomatizatsii proizvodstvenniih proțessov, Moskva, Mașinostroenie, 1974
229. Manea C. : Unități de măsură, București, Editura Tehnică, 1968
230. Mascag A. : Tehnica galvanoplastica, București, Editura tehnică, 1974
231. Matalin A.A. ș.a. : Peredovais tehnologii i avtomatizatsii upravleniia proțessami obrabotki detalei mașin, Leningrad, Mașinostroenie, 1970
232. Mc Gough J.A., Rasmussen R. : A perturbation analysis of the electroforming process, in *Journ. Appl. Elect. Tech.*, vol. 15, 1976, p.271-278
233. Mendelison V.S., Rudman L.I. : Tekhnologii izgotovleniia ștampov i pressform, Moskva, Mașinostroenie, 1970
234. Mesarovic M.D. ș.a. : Theory of hierarchical, adaptive systems, Cleveland, Case University, 1970
235. Meșceriakov G.N., Mal'nev V. : Vlianiia pulsnogo razraba s sredstv na elektricestva erodii metallov, in *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta obrabotki materialov*, Minsk, 1975, p.50-53
236. Meșceriakov G.N. : Electro-Physical Processes in Dielectric Pulse Metal Cutting from the Point of View of Efficiency and Polarity of electrode wear, *J. Appl. Elect. Tech.*, vol. 15, 1976, p.491-498
237. Meyer H. : Herstellung von Schmelzen, deren Gravurform durch Electroerosion. Spülung und Elektroerodierung, *Fertigungstechnik und Betrieb*, nr. 1, 1970, p.220
238. Meyer H. : Einfluss von Werkstofftemperatur, Elektroerodierstoff und Gravurform auf das Arbeitsergebnis beim elektroerosiven Senken, in *Fertigungstechnik und Betrieb*, vol. 1, 1971, p.228-233
239. Miclogi V. ș.a. : Indicator pentru măsurarea opalescenței, București, Editura tehnică, 1968
240. Mihalev S.D. : Avtomatizatsii proțessov podgotovki instrumentstva, Minsk, Belarusi, 1975
241. Miklogi C. : Sudarea metalelor, București, Editura Tehnică, 1966
242. Mitrofanov S.P. ș.a. : Nauchnais organizatsii v oblasti proizvodstva, Leningrad, Mașinostroenie, 1970
243. Mitrofanov S.P. ș.a. : Progressivnii metody tehnologii obrabotki podgotovki serijnykh proizvodstv, Leningrad, Mașinostroenie, 1971

244. Mitrofanov S.P. ș.a. : Avtomatizăția tehnologică și pregătirea serii în producția de masă, Moscova, Mașinostroenie, 1974
245. Mițkevici M.K., Banciukovskii A.A. : Tri oblasti tehnologii elektroobrabotki, în Impulsiune metode obrabotki materialov, Izd. Nauka i tehnika, 1977, p.102-105
246. Moiseev M.P. : Ekonomika tehnologii i konstrucii, Moskva, Mașinostroenie, 1973
247. Motoki M. : Tehnica actuală a metodelor electrofizice și electrochimice, în Kikai gazetintsa, nr.2, 1973, p.18-20
248. Mrocek J.A., Triputin B.N. : Ob izmenenii velicin radiusev zakruglenii v ostrîh uglaeh obrabotivaemoi polosti izvelia pri elektroerozionnoi obrabotke staloi staliinîmi elektrodami, în Vopr. procinosti i plasticinosti metalov, Minsk, Izd. Nauka i tehnika, 1972, p.239-240
249. Mrocek J.A. : Obrazovanie konusnosti pri elektroerozionnoi obrabotke, în Impulsiune metode obrabotki materialov, Minsk, Izd. Nauka i tehnika, 1977, p.175-180
250. Muha I.M., Globa L.V. : Elektroerozionnaia stoilosti nekotorîh tugoplavkih soedinenii i metalov, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr.3, Kijev, 1969, p.14-18
251. Namatevs A.A. : Nekotore osobennosti poliarnovo efekta elektriceskoi erozii pri povtoriașciinîi razriada, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr.1, Kijev, 1969, p.25-30
252. Namatevs A.A. : Fiziceskii osnovu dimenzii obrabotki uglerodistoi komponent. otlojesii na elektrodah pri elektroerozionnoi obrabotke uglerosoderjașcih sred, în Elektronnaia obrabotka materialov, nr.4, Kijev, 1969, p.33-41
253. Nanu A., Popa H. ș.a. : Aplicația industrială a metodei electroerozive la fabricarea benzilor, contract de cercetare științifică IP Timișoara-Inst. Electronica Timișoara, 1968, rezumat în Căsuț selectiv cu lucrări de colaborare cu producția, Facultatea de Mecanică Timișoara, 1968, p.35-36
254. Nanu A., Popa H. ș.a. : Cercetări privind determinarea tehnologiei optime de prelucrare prin electroeroziune a cilindrelor din aliaj dur, contract de cercetare științifică IP Timișoara-Ūzina Ūelului Roșu, 1970, rezumat în Căsuț selectiv cu lucrări de colaborare cu producția, Facultatea de Mecanică Timișoara, 1970, p.61-62
255. Nanu A., Michici A., Popa H. : O nouă concepție a metodei eroziunii de prelucrare dimensională prin eroziune, în Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, actele Conferinței Naționale de Tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1971, p.11-20
256. Nanu A., Busulici D. : Posibilități de optimizare a programării parametrilor electricei la prelucrarea prin eroziune electrică, în Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, materialele CITA, Timișoara, 1971, p.12-13
257. Nanu A. : Tehnologia materialelor, Iașurești, editura didactică și pedagogică, 1972
258. Nanu A., Popa H. ș.a. : Studiul preliminar al dimensiunii de prelucrare prin eroziune electrică a Ūelului Roșu, contract de cercetare științifică în R.S.R., utilizate la fabricarea benzilor și cilindrelor, contract de cercetare științifică I.T.V. Timișoara-Inst. Electrotim. Timișoara, 1970-1977

259. Nanu A., Popa H., Achimescu N. : Particularități ale generării suprafeței la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, lucrare prezentată la Sesiunea de comunicări științifice IPFV Timișoara, 1973
260. Nanu D. : Prelucrarea prin eroziune electrică în câmp magnetic, teză de doctorat, IP Cluj-Napoca, 1979
261. Neely L. : Performance and Evaluation of EDM electrode materials, în Technical Paper American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Dearborn, USA, 1969
262. Nekrașevici I.G., Bakuto I.A. : K voprosu o zavisimosti elektroerozionnogo efekta ot slinnoi razriadnogo promezhka, în Jurnal tehnică și fizică, nr.5, Moskva, 1962
263. Neroslavskii A.P. : Issledovanie izmeneniia forma elektrodov v proceŝse elektroerozionnoi obrabotki, în Impulsi metode obrabotki materilov, Minsk, Izd. Nauka i Tehnika, 1977, p.171-175
264. Nichici A. : Influența materialului și geometriei electrodu-lui sculă asupra parametrilor de prelucrare cu scintei electrice a pieselor din oțel C 120, în Construcția de mașini, nr.12, 1966, p.724-728
265. Nichici A. : Fenomene fundamentale la prelucrarea cu scintei electrice cu electrod oscilant, teză de doctorat, IP Timișoara, 1970
266. Nichici A. : Tehnologia materialelor și mașini unel . IPFV Timișoara, 1974
267. Nichici A. : Probleme ale modelării sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică, în materialele celelalte și II-a conferințe Tehnologii noi în construcția de mașini, Galați, 1977
268. Nichici A. : Tehnologia materialelor, vol.1, I.T. Timișoara, 1979
269. Nikolov I. : Cibernetica și economia. București, Editura politică, 1973
270. Obaciu Gh. : Contribuții la studiul comportării capetului de electroni piesă-sculă la prelucrarea materialelor metalice cu impulsuri electrice, teză de doctorat. I. Timișoara, 1969
271. Obaciu Gh. : Contribuții la studiul distribuției de sarcină impulsului la prelucrarea electroerosivă, în Tehnologii și metode neconvenționale în prelucrarea metalelor, materialele CNTN, Timișoara, 1971, p.171-175
272. Obaciu Gh., Wertheim A. : Anupra unor metode pentru a reduce mijlocită a uzurii electro duului sculă la prelucrare electroerosivă, în Săptămânal Universității, Timișoara, nr.173 1974, p.55-64
273. Odnorolov N. : Galvanotekhnika i elektroerodirovanie, Moskva, Izd. Mashinostroenie, 1974
274. Olsen K.V. : Effektivitet ved gnittembeholdning, in Tekn. tidsskr., nr.11-24, 1970
275. Onoue J. : Preparation of EDM electrodes by spark forming, în ISM 3, Vienna, 1970
276. Oprea H., Pleșoianu G. : Analiza din punct de vedere economic, București. Editura științifică și enciclopedică, 1975
277. Orgovan I. : Galvanofornung. Anwendung der elektrolytischen Formung auf dem Gebiet der Herstellung von Werkzeugen zur Bearbeitung von Kunststoffen, in Techn. Rundsch., nr.11

278. Otto M. ș.a. : Istociniki pitanija elektroerozionnii i sprovalino-prošivocinii stonkov, în Stanki i instrument, nr.3, Moskva, 1977, p.13-19
279. Pahlitsch W. ș.a. : efectul de polaritate la eroziunea prin scînteii, în CIRP, nr.3, 1968, p.243-244
280. Pale M.M. : Tehnologhia proizvodstva prišpoblenii, presform i ștampov, Moskva, Izd. Mashinostroenie, 1971
281. Palfalvi A. : Tehnologia materialelor, Cluj, IP Cluj-Napoca, 1973
282. Panov V.P. : Optimalnoe upravlenie ravnomernostii palivno-pokrîtii, în Proektirovanie, ekonomika i organizaciia proizvodstva v ŧehah metallopokrîtii, Moskva, 1973, p.85-91
283. Păduraru I. ș.a. : Modelarea procesului tehnologic din combinatele industriale, în Metode și procedee tehnice de calcul economic în agricultură, vol.1, București, Editura Academiei RSR, 1971, p.194-230
284. Peciuro N.S. ș.a. : Vliianie sostava mejelektrodnoi erodii na erozii elektrodov pri vozdeistvii edinicinnii razriadov, în Elektronnaia obrabotka materielov, nr.6, Kișinev, 1969, p.33-37
285. Penescu C. : Conceptele teoriei sistemelor, în Automatizări și electronica, nr.3, 1971, p.100-111
286. Penescu C. : Sisteme. Concepte, caracterizări, sisteme liniare, București, Editura tehnica, 1975
287. Peteanu V. ș.a. : Conducerea și informatica, Cluj-Napoca, Editura Dacia, 1975
288. Peters A. : Ein Grundlagenbeitrag zur Funkenerosion, in Ind. Elek.+Elektron., nr.18, 1970, p.449-453
289. Peters A. : Stand der Metallbearbeitung durch Funkenerosion und ihre Anwendung, în Maschinénmarkt, nr.30, 1974, p.1120
290. Petreikis P.A., Ustianțev A.A. : Elektroerozionnii i sprovalino-prošivocinii stonok mod.4B/111 s osolo teorii i ustanovkoi koordinat, în Stanki i instrument, nr.3, Moskva, 1977, p.15-16
291. Petriceanu Gh. : Tehnologia construcției de mașini, Cluj, IP Cluj, 1969
292. Picos C. : Tehnologia construcției de mașini, Cluj-Napoca, Editura didactică și pedagogică, 1977
293. Poduraev V.N., Kamalov V.S. : Fiziko-khimicheskie mekhanizmy obrabotki, Moskva, Mashinostroenie, 1975
294. Polanski L. : elektroiskrove granicni detali erodnii kompensacijnymi, Warszawa, Siemnikowa Nauko-techniczny, 1965
295. Poluianov V.B. : Novoe oborudovanie dlia kontrolirovaniia koi i elektrohimiceskoi obrabotki, în Stanki i instrument, nr.6, Moskva, 1975, p.40-45
296. Poluianov V.T. : Strukturnie preobrazovaniia tehnologii i mehanosberecinovo proizvodstva, Moskva, Mashinostroenie, 1973
297. Ponomarenko L.I., Kastvorțev A. : Fiziko-khimicheskie mekhanizmy izgotovleniia tehnologiceskoi obrabotki i instrument, Murikov, Izd. Prapor, 1974

298. Popa H., Achimescu N. : Procese și factori care influențează uzura electrodului la prelucrarea electroerozivă și copierea formei, în Buletinul științific și tehnic al I.P.T.V., seria mecanică, tom 17(31), Fascicula 2, Timișoara, 1972, p.215-221
299. Popa H. ș.a. : Metodica proiectării proceselor tehnice de prelucrare dimensională prin eroziune electrică, îndrumător pentru cursurile postuniversitare de Tehnică și mecanică convenționale în prelucrarea metalelor, Timișoara, Facultatea de mecanică, 1972
300. Popa H. : Metodică pentru proiectarea organizării funcționării de mașini și aparate. în Al VI-lea simpozion de organizare a producției, proiectare, sisteme de producție, Timișoara, 1978, p.115-120
301. Popa H. : Economia și organizarea producției, Timișoara, Facultatea de mecanică, 1979
302. Popa H. : Tipul seriei de fabricare ca parametru la proiectarea sistemelor ingineresti în construcția de mașini, lucrare comunicată la Al VII-lea simpozion de organizare a producției, Timișoara, 1979
303. Popa H., Ioanovici Fr. : Metodica unitară în analiză și ingineria valorii, în Informatica pentru conducere. Progrese în informatica românească, Iași Cluj. Cluj-Napoca, 1980, p.25-26
304. Popa H. ș.a. : Model matematic pentru procesul de uzură a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică și copierea formei, lucrare prezentată la Sesiunea de comunicări științifice a IPTV Timișoara, 1979
305. Popa H., Achimescu N. : Studiul generării suprafeței la prelucrarea prin eroziune electrică în condiții de evacuare instantanee a materialului excedentar, lucrare prezentată la Sesiunea de comunicări științifice a IPTV Timișoara, 1979
306. Popa H. ș.a. : Utilizarea unor modele ale termenilor în procesele ireversibile în teoria generării suprafeței la prelucrarea dimensională, în Buletinul științific și tehnic al IPTV, seria mecanică, tom 18(34), Fascicula 1, Timișoara, 1980
307. Popa H., David I. : Model matematic pentru procesul de generare a suprafeței la prelucrarea dimensională prin contact cu copierea formei, în Buletinul științific și tehnic al IPTV, seria mecanică, tom 18(39), Fascicula 1, Timișoara, 1980
308. Popa H. : Studiul funcțiilor unui produs, în Acorduri și Organizarea producției, îndrumător de lucrări, Timișoara, Facultatea de mecanică, 1979, p.39-43
309. Popa H. : Analiza tehnico-economică a valorii de menținere a unui sistem tehnic, în Acorduri și Organizarea producției, îndrumător de lucrări, Timișoara, Facultatea de mecanică, 1979, p.46-50
310. Popa H. : Domeniile aplicării eficiente a tehnologiilor noi, în Economia și organizarea producției, îndrumător de lucrări, Timișoara, Facultatea de mecanică, 1979, p.61-64
311. Pophale S.R. : Manufacturing of cavity dies for steel moulds, forging die casting using etc., în Engineering, 1977, p.45-48
312. Popilov L.I. : Galivanoplastika, Leningrad, Mashinostroitel'nyi, 1971
313. Popilov L.I. : Osnovi elektrotzarnogo i elektroerodivnosti, Leningrad, Mashinostroitel'nyi, 1971

314. Popilov L.I. : Spravocinik po elektriceskim i ultrazvukovim metodam obrabotki materialov, Leningrad, Mashinostroenie, 1971
315. Popovici C., Savii Gh. : Tehnologia constructiilor de masini, Bucuresti, Editura didactica si pedagogica, 1961
316. Quarz W. : Eine Galvanik im Wandel der Technik, in Technik, nr.11, 1976, p.1054-1057
317. Rabinovici A.N. : Mecanizarea si automatizarea constructiilor in constructia de masini si aparate. Bucuresti, Editura tehnica, 1962
318. Rădoi I. : Electrochimie, Manual de lucrari practice. Timisoara, IP Timisoara, 1968
319. Rădoi I. : Electrochimie, Timisoara, IP Timisoara, 1970
320. Rădoi I. ş.a. : Electrochimie, Timisoara, Editura Tehnica, 1974
321. Ratmirov V.A. ş.a. : Sistemii upravleniia uciastkom elektroerozionnih stankov na osnove seti malih EVM, in Stanki i instrument, nr.9, Moskva, 1977, p.23-24
322. Reglow E. : Rechner steuert Drahtvorschub. Funkenerosionsmaschine hat einen direkten Computeranschluss, in VDI-Nachrichten, nr.41, 1977, p.5
323. Remscheid H. : Neuzliche Anwendung der Funkenerosion zur Herstellung von Kaufformen in Industrie, in Industrieanzeiger, nr.84, 1967, p.19-23
324. Rhea N.W. : Breakthrough in EDM elektroerosion and Prod., nr.12, 1976, p.70-72
325. Rhyner H. : La technologie, in Informations techniques Chammilles, nr.11, Geneva, 1966, p.17-
326. Riggs J.L. : Production systems: Planning, Analysis and Control, New York, John Wiley and sons, Inc., 1970
327. Roche P. : Dielektriki, materialii elektrode i upravlenie elektrovo izdeliia, pri elektroerozionnoi obrabotke, in 4. Bratislava, 1974, p.184-190.
328. Roman I. : Tehnologiile neconventionale in prezenta perspectiva dezvoltării lor in viitor, in Constructii de masini, nr.2-3, 1977, p.69-77
329. Romanovski V.P. : Spravocinik po obrabotki stankov. Leningrad, Mashinostroenie, 1971
330. Roth A. ş.a. : Szikrarörgacsolás. Budapest, Műszaki Kiadó, 1961
331. Rozanov V.A. : Elektroiskrovia obrabotka bez innoi instrumenta, in Novoe v elektrofizicam i elektroobrabotke materialov, Leningrad, Mashinostroenie, 1971, p.179
332. Roze L.V., Gleihman B.M. : Faktory vliyaniia na rezul'taty elektroerozionnoi obrabotki s pomoganiem innoi elektrode i elektroobrabativaluşevo elektroda, in Elektroobrabotka materialov, nr.2, Kijev, 1971, p.11-15
333. Saito N. ş.a. : Mitsubishi Electric. Proceedings of the Japan Soc. of Elec.-Mech. Engrs. 1977, p. 42-52
334. Saito N., Kobayashi K. : Electro-erosion with Low Electrode Wear with Rectangular Wave, in Proc. Japan Soc. of Prec. Eng., 1977, p.10-12

335. Sato K., Oya K. : Maşinile electroerozive flux, în *Shinkuishi denki giho*, nr. 10, 1971, p.134-135
336. Saito T. ş.a. : Utilaje şi domenii de aplicare pentru erodarea electroeroziva, în *Kiani Shisutsu*, nr. , 1973:p.27
337. Saito T., Sato K. : Conducerea cu comandă program în prelucrarea electroerozivă, în *Kianu te gocu*, nr.6, 1973, p.100-74
338. Saito N. : Dezvoltarea metodelor de prelucrare electroerozivă şi electrochimică, în *Seimitsu shikai*, nr. 10, 1971, p.943-9
339. Saito N. ş.a. : Starea şi perspectivele dezvoltării prelucrării electroerozive şi electrochimice, în *shikai te goku*, nr.2, 1975, p.36-42
340. Samsonov G.V., Muha I.I. : Zakonemernosti opredeleniia iznos katoda pri elektroskrovoi obrabotke metalov, în *Elektronnaia obrabotka materialov*, nr.1, Kiyinev, 1967, p.17-24
341. Samsonov V.G., Berhoturov A.B. : Zakonemernosti erozii katoda i anoda pri elektroskrovom uprocinenii, în *Elektronnaia obrabotka materialov*, nr.1, Kiyinev, 1966, p.25-29
342. Sandford J. : EDM sparks-in as high production tool, în *Iron Age*, nr.18, 1973, p.55-62
343. Sateli E.A. ş.a. : Problemi razvitiia tehnologii v inostroeniia, Moskva, Maşinostroenie, 1967
344. Savas E.S. : Conducerea cu calculator a proceselor industriale, Bucureşti, Editura tehnica, 1968
345. Savii Gh. : Studiu asupra prelucrabilităţii fontelor de uzură prin procedee electroerozive, teză de doctorat, Iaşi, 1970
346. Savii Gh., Popa H. : Ob ergonomiceskii voprosii pri elektrofiziceskoi i elektroniceskoi obrabotke v maşinostroeniia, în *Ergonomika, proizveditel'nosti i obščee razvitiie sotsialisticeskoi licinosti*, Burgas, 1979
347. Schacher G.D. : Elektroeroziionii obrabotka tolli i metalin instrumentov, în *Isk. 4. Prati.*, vol. 1974
348. Schadach F. : Herstellung von Bronzeverbindungen durch EDM, in *Deutsche Maschinenmarkt*, nr.12, 1971, p.1-15
349. Schadach F. : EMO'75: Abtragsteigerung bei sunkender Kosten elektrochemische Verfahren, in *Deutsche Maschinenmarkt*, nr. 1975, p.1267-1269
350. Schadach F. : CNC-gesteuertes EDM für den maschinellen Industrie-Anzeiger, nr.59, 1972, p.1-12
351. Schekulin K. : Dreidimensionale Erodierung als ein Merkmal des elektroerosiven Atragens, in *Maşinostroenie*, nr. 1978, p.1594-1597
352. Schekulin K. : Automatisieren der Standard-Erosion, in *Maşinostroenie Rundschau*, nr.41, 1979, p.29
353. Schulz H.J. : Über den Zusammenhang zwischen den Parametern beim Funkenerosiven Schneiden von Stahl, in *Maşinostroenie-technik*, nr.8, 1960, p.403-404
354. Schulz H.J. : Vergleich verschiedener Elektrodenmaterialien für Formelektroden für die Standard-Erosion, in *Maşinostroenie-technik*, nr. 1979, p.1-12
355. Schwaacher E. : Der Verteilung des Erosionsproduktes bei der Funkenerosion, in *Maşinostroenie-technik*, nr.50, 1967, p.1000-1040

356. Schumacher B. : Elektrodenverschleiß bei der Bearbeitung von Elektroden. Vortrag ISTR/Fe/Bz, 1968 - Bucharest.
357. Schwabe H.U. : Nickel- und Nickel/Nickel- Galvanische Korrosion aus dem konzentrierten Sulfamat-Elektrolyten. In: Informatik - Anzeiger, nr.34, 1973, p.701-70
358. Semon G., Jean Mairet A.: Usinage des surfaces de précision dans l'industrie automobile, in Informatique technique des Charmilles, nr.11, 1968, p.59-77
359. Semon G. : Guide pratique d'usinage par électroérosion des Charmilles, Geneva, 1975
360. Semon G. : Usinage isotropique : possibilités et applications, in Mach.prod., nr.212, 1970, p.17-26
361. Sieper R. : Senk- und Drahterosionsmaschinen. Stand und Entwicklungstendenzen, in Maschinenmarkt, nr.77, 1977, p.491-494
362. Silaş Gh. ş.a. : Culegere de probleme de vibrații mecanice, București, Editura tehnică, 1973
363. Simon W. : Conducerea numerică a mașinilor unelte, București, Editura tehnică, 1967
364. Siwczyk M. : Niektóre zagadnienia przy stosowaniu roboty bocznych stosowanych w obróbce elektroerozyjnej. Informatik, nr.9, Warszawa, 1973, p.458-464
365. Shenoi B.A. ş.a. : Ultrasonics in metal finishing. In: Finishing, nr.7-8-9, 1970
366. Snoyes R. ş.a. : Analysis of the electroerosion, in Proceedings, Zürich, Juris-Verlag, 1971
367. Sosenko A.B. : Skorosti formirovaniya pri krovnoy i povnoprotyvopichnykh rabotakh, in Stroj i Instrument, nr.1, Moskva, 1970, p.23-29
368. Sosenko A.B. ş.a. : Elektroeroziya i korrozii pri krovnoy i povnoprotyvopichnykh i vitiaynykh stampovaniyakh, in Stroj i Instrument, nr.9, Moskva, 1974, p.29-37
369. Sosenko A.B. : Davlenie v mezhkontaknykh kamere pri elektroeroziyonomoi obrabotke. In Stroj i Instrument, nr.1, Moskva, 1970, p.39-39
370. Starr M.K. : Conducerea producției. București, Editura tehnică, 1970
371. Stavičkii B.I., Bezrua A.I. : Vliyanie velichin nagreva i novonovo promejutka na efekt erozii i korrozii pri krovnoy i povnoprotyvopichnykh i vitiaynykh stampovaniyakh, in Stroj i Instrument, nr.5, Moskva, 1969, p.1-14
372. Steineck A. : Ein neuer Elektroerodierverfahren zur Vermeidung der Erosion, in Technica, nr.4, 1973, p.201-204
373. Stempel G. : Funkenerosions-elektroden und detailherstellung, eigenschaffen und verhalten, in Werkstatt und Betrieb, nr.9, 1978, p.194-201
374. Stepanov V.G., Savrov I.A. : Vvedenie v spetsialnuyu teorii i metode obrabotki metalov. In: Informatik, nr.1, Moskva, 1975
375. Stețiu G. : Așchierirea și șlefuirea cu ultrasunete, lucrarea de licență de didactică și pedagogică, 1970
376. Suciu I. : Studiu tehnico-economic al metodei de șlefuire cu ultrasunete a unor echipamente pentru mașini unelte, lucrarea de proiect de diplomă concepută de către autorul prezentei lucrări, București, 1971

377. Şakalis V.V. : Modelirovanie teorii obrabotki s pomoshch'yu matematicheskoi mekhaniki, Moskva, Maşinostroenie, 1975
378. Şmakov G.S. : Ostruktura obubivaniya pri povremennom troerozionnomu stoikosti materialov, in Elektronnaya obrabotka materialov, nr.4, 1975, p.18-
379. Şonţea S. ş.a. : Consideraţii asupra problemei economice a electrozilor utilizate în procesul de troeroziune, in Construcţia, nr.1, 1975, p.110-
380. Şonţea S. ş.a. : Tehnologii de realizare a unor lucrătoare, Bucureşti, editura de ştiinţă şi tehnică, 1975
381. Şveţ V.V. : Raspredelenie temperatury i kinetiki v maşinostroenii po energetičeskim urovniam različnykh zonam, in Vestnik maşinostroenija nr.1, 1975, p.61-62
382. Taniguchi N. ş.a. : The optimum form the current EDM, in CIRP, nr.1, 1971, p.41-42
383. Tarzimanov G.A. : Proektirovanie metallorezjuşcin strojov, Izd. Maşinostroenie, 1972
384. Tudosescu I. : Clasificarea şi sistemele ştiinţelor, tehnică, cunoaştere, valoare, Bucureşti, Editura ştiinţifică şi pedagogică, 1970, p.47-64
385. Tudosescu I. : Structura ştiinţelor, valoare şi politică, 1972
386. Tudosescu I. ş.a. : Filosofie, istorie, fizică, chimie, Bucureşti, editura de ştiinţă şi tehnică, 1975
387. Vaida A. ş.a. : Maşini-unelte, Bucureşti, Editura ştiinţifică şi pedagogică, 1970
388. Van Dijk ş.a. : Some results of the study of the EDM, in ISEM 4, Bratislava, 1975
389. Van Dijk P., Snoyer K. : A theoretical study of the main parameters governing the EDM machining process, in Mec. metal. (Praga), nr.1, 1975, p.9-10
390. Vasiliev V.S. : Elektrizatsionnyy instrument, nr.9, Moskva, 1975, p.1-
391. Veroman V.I. : Analiz svyaznykh i raznykh po kociast otніх impulsnykh parametrov i ikh harakteristikami elektroerozionnoy obrabotki vov, in Elektronnaya obrabotka materialov, nr.1, 1975, p.1-
392. Veroman V.V. : Generatsionnyy instrument obrabotki, in ISEM 4, Bratislava, 1975
393. Vilister V.M., Sedova M.M. : Izučenie raznykh plenok na elektroerozionnoy obrabotke, in Fizika i himiya obrabotki materialov, nr.1, Moskva, 1957, p.18-29
394. Volcenkova R.A. : Ob erozionnoy obrabotke i problema obrabotke materialov, in Mec. metal. (Praga), nr.1, 1975, p.1-
395. Volkov I., Livşiţ A.B. : Shchegolki i fragmenty produktov erozii iz nejelentnykh materialov, in himia obrabotki materialov, nr.1, Moskva, 1975, p.1-
396. Volkov I.S., Livşiţ A.B. : Fizika i himia Elektroerizatsionnoy obrabotki, Moskva, 1972, p.1-7

397. Volkov I.S., Livşiy A.I. : Nekotoraia voprosy teorii elektro-obrazovaniia, in Fizika i himiia obrabotki materialov, nr.1 Moskva, 1974, p.84-90
398. Vorobiev A.A. : Fizicheskie osnovy ustoiçivosti, obrabotkae-mosti i iznosa materialov pri elektriceskoi erozii, in Elektronnaia obrabotka materialov, nr.7, Æiginevskii, p.14-17
399. Vulcu V. g.a. : Proiectarea și construirea garniturilor de model pentru turnatorie, București, Editura tehnică, 1971
400. Warnecke H.J., Weiler G.G. : Herstellen von erodierelektroden durch Galvanoformung, in Zins. nr.1, 1975, p.104-107
401. Warnecke H.J., Weiler G.G. : Werkzeugherstellung mit galvanogeformten Erodierelktroden, in Werkstattstechnik, nr.5, 1975, p.289-296
402. Wearmouth W.R. : Principles and applications of electroforming, in Proc., 14 th Int., Mach. Tool Des. and Res. Conf., Manchester 1973, London 1974, p.587-595
403. Weber J.M. : Electric discharge machine with mechanism for orbiting the electrode on a polygonal path, inventie SUA, nr.3809852, înregistrată 1972, publicată 1974
404. Weiler G.G. : Galvanoelektroden zum erodieren großer formwerkzeuge, in Industrie-Anzeiger, nr.55, 1975, nr.10
405. Weiler G.G., Bolch T. : Innere Spannungen in elektrolytisch abgeschiedenden Kupferelektroden, in Metalloberfläche, nr.11, 1975, p.552-558
406. Weiler G.G. : Galvanoformungsmaschinenwerkzeugen, in Maschinenbau, in Metalloberfläche, nr.11, 1975, p.559-57
407. Weiler G.G. : Galvanoformen in der Fertigung wirtschaftlich betrachtet, in Maschinenmarkt, nr. 1, 1976, p.104-106
408. Weiner R. : Ultraschall in der Galvanotechnik in Hoch-Ronre-Profile, nr.7, 1976, p.294-297
409. William W.W. g.a. : Contraction and expansion processes, Dearborn, USA, 1957
410. Wilson C. : Analysis of SMI performance and tool wear in the Copper-Steel system, in Technical Paper Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, USA, 1970, p.1-10
411. Winkler R. : Galvanoformung, in Jahrb. Oberflächentechnik, Band 32, Berlin, 1976, p.104-106
412. Wissler K. : Anwendung von Diesmaschinen im Werkzeugbau, in Maschinenmarkt, nr.60, 1976, p.1360-1361
413. Works N., Saito N. : Starea actuala și perspectivile tehnologiei delor electrice de prelucrare, in Situații tehnice, nr. 10, 1971, p.126-132
414. Zabel H. : Einflüsse auf die Herstellbarkeit von Werkzeugelektroden für Zundererosion, in Werkstattstechnik, nr.6, 1962, p.315-316
415. Zndeh L.A. g.a. : Teoria sistemelor de prelucrare, Editura tehnică, 1974
416. Zemlegliadov K.G. : Sovremennoe sostoiianie i perspektivy razvitiia melkoserilnovo proizvodstva, in Elektronnaia obrabotka materialov, nr.7, 1973
417. Zimany J. : Matematisches Modell der elektrolytischen minimalen SMI-Prozesse, in Werkstattstechnik, nr.6, 1976, p.315-316

418. Zingherman A.S. ș.a. : Izнос электродов-инструментов при обработке электроэрозионно материала при электропulsной обработке. In Stanki i instrument, nr.6, Moskva, 1961, p.20-.
419. Zingherman A.S. : Obrazovanie kristalliceskovo gipofiznogo gorenii elektriceskoi dughi v mineralnom masle. In Izvestiia vuzov, Fizika, nr.5, Moskva, 1963, p.175-8
420. Zingherman A.S. : Problema beziznashnoye elektroerodirovaniya in Elektronnaia obrabotka materialov, nr.1, Kiginev, 1972, p.32-41
421. Zlobin G.P. : K metodike opredeleniia erozionnoi stoikosti, in Elektronnaia obrabotka materialov, nr.1, Kiginev, 1971, p.9-11
422. Zlobin G.P. : Mednie elektroci-instrumenti povyshenoi elektroerozionnoi stoikosti, in Elektronnaia obrabotka materialov, nr.2, Kiginev, 1975
423. Zolotih B.N. : Fenomenologicheskaja teorija elektroiskrovoi razmernoj obrabotki, in ISEM 3, Viena, 1970
424. x x x Matematika i kibernetika v ekonomike. Slovart-spravocinik, Moskva, Izd. Ekonomika, 1975
425. x x x Metoda cercetării sistemice. București, Editura științifică, 1974
426. x x x Sisteme în științele sociale, București, Editura Academiei RSR, 1977
427. x x x System engineering handbook, New York, McGraw-Hill Book Company, 1968
428. x x x Views on General System Theory, New York, Wiley and Sons, Inc., 1964
429. x x x CNC- Erodiermaschine, in Werkstatt und Betrieb, nr.9, 1979, p.162
430. x x x CNC- steuerung für Funkenerosionsmaschinen und Planetarodieren, in Maschinenwelt, nr.79, 1979, p.2708
431. x x x Cooperative research on electroerosion and comparative tests in order to define minimum thickness of piece materials, in CIRP, Science, Volume 2, 1973
432. x x x Electrical machining technology, Design Engineering, nr.6, 1971, p. 251
433. x x x Electro-érosion: bilan et évolutions, Revue Industrielle, in Mach. prod., nr.247, 1973, p.2722
434. x x x Elektrofizikohimicheskie stanki i vstavki. Obrazovanie otecestvennoye stankostroenie, in Stanki i instrument, nr.3, Moskva, 1977, p.41-44
435. x x x Fizicheskie osnovy elektroerodirovaniya materialov, Moskva, Izd. Nauka, 1968
436. x x x Funkenerosionsmaschine, in Werkstatt und Betrieb, nr.1, 1975, p.1-4
437. x x x Funkenerosionsmaschine, in Werkstatt, nr.1, 1975, p.1075
438. x x x Impulsiivnye metody obrabotki materialov, Nauka i tehnika, 1977
439. x x x Informations techniques Chemilab, nr.11, 1966
440. x x x Manufacturing engineering handbook, nr.1, p.235-240
441. x x x Neuartige Fertigungsmaschinen der Werkzeugtechnik, München, Carl Hanser Verlag, 1972

442. x x x *Feredovana tehnologija i avtomatizacija proizvodnje* professami obrabotki detalni mašin, Leningrad, 1970
443. x x x *Terminology on Electro-Chemical Machining and Electro-Disch arge Machining*, Lindover: University Press, 1974
444. x x x *Abbrand bei Funkenerosion -elektroden*, 1974, nr.7, p.251
445. x x x *The EDM Reporter*, Poco Graphite, Inc., Denton, USA, 1972
446. x x x *Airco Spear EDM electrode materials for electrical discharge machining*, Electrocoat, Inc., Brownsville, USA, 1971
447. x x x *Electroformed electrodes for EDM*, in *Tool and Prod.*, nr.1, 1974, p.72-73
448. x x x *Funkenerosion mit Graphitelektroden Material. Vorzüge und Bearbeitung*, in *Metallhandwerk+Techn.*, nr.8, 1979, p.681-682.
449. x x x *Issledovaniia v oblasti elektroosajdeniia metallov*, Vilnius, 1977
450. x x x *Prikladnaia elektrohimiia*, Moskva, Izd. Khimia, 1974
451. x x x *Prikladnaia elektrohimiia*, Moskva, Izd. Khimia, 1975
452. x x x *Producing Graphite Electrodes for EDM*, in *Tool and Metal Mould*, nr.5, 1977
453. x x x *Technical Information no.442, Union Carbide Corporation*, Chicago, 1972
454. x x x *Tekhnicheskie rekomendatsii po primeneniiu i izbraniu materialov i metodov ispol'zovaniia elektroosajdeniia i elektroerodirovaniia dlia elektrosionnoi i elektroničeskoj obrabotki valino-prošivocinii stankov*, in *Metallurgičeskii žurnal - elektrohimičeskie metody obrabotki*, nr.1, 1977, p.10-11
455. x x x *AGIE Livret d'instruction pour l'usage des générateurs AGIERÜLS-1*, Langres-France, 1971
456. x x x *AGIE Kunden-Schulung für den Elektroerosion*, Langres-France, 1971
457. x x x *EROSIMAT DFE-50-C Le fabricant de l'étampage*, Langres, 1971
458. x x x *Instrucțiunile de folosire pentru aplicarea electrodului prin electroeroziune ALAR-oleul*, P. Distr. Timișoara, 1978
459. x x x *Elektrodynamischer Schwingkreis*, Dresden, VEB-RTI Neanderstrasse 100, 1978
460. x x x *Leistungverstärker für den Frequenzbereich*, Metra Mess- und Frequenztechnik, München, 1977
461. x x x *Generstor de joasă frecvență*, București, 1976
462. x x x *Măsurarea vibrațiilor*, București, 1977
463. x x x *Oscillografi sistemelor de comandă*, București, Maspriborintorg, 1977
464. x x x *Galvanometri-vataki oscillografičeskie*, București, Maspriborintorg, 1977
465. x x x *Banca Națională a României*, București, 1975
466. x x x *Documentația tehnologică*, București, Editura Tehnică, 1977

467. x x x Dicționar de filozofie, București, Editura ...
1978
468. x x x Manualul inginerului mecanic, vol.3, Termenuri în construcțiilor de mașini, București, Editura tehnică, 1978
469. x x x Lexiconul tehnic român, vol.1-10, București, Editura tehnică, 1957-1966
470. x x x STAS 270/1-74 Cupru. Marci, București, Editura tehnică, 1974
471. x x x STAS 642-71 Catozi din cupru. Condiții generale, București, Editura tehnică, 1971
472. x x x STAS 3583-64 Oțel rezistent la coroziune în aer liber, prelucrat la cald, București, ISIAR, 1964
473. x x x STAS R 6388-68 Metale și aliaje neferoase standardizate. Nomenclator și corespondențe, București, ISIAR, 1968
474. x x x STAS 6909-75 Normarea muncii. Terminologie, București, Editura tehnică, 1975