

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA ROMÂNIA

FACULTATEA DE MECANICĂ

CATEDRA de TEHNOLOGIE MECANICĂ

Diplomat Inginer *Siegfried HEBER*

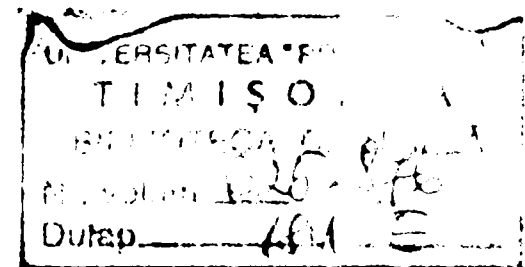
*Contribuții la optimizarea tehnologiei de prelucrare
prin eroziune electrică cu rupere de contact
(E.E.R.C.) a aliajelor de aluminiu.*

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC.

PROF. DR. DOC. ST. D.H.C. ING. *Aurel NANU.*



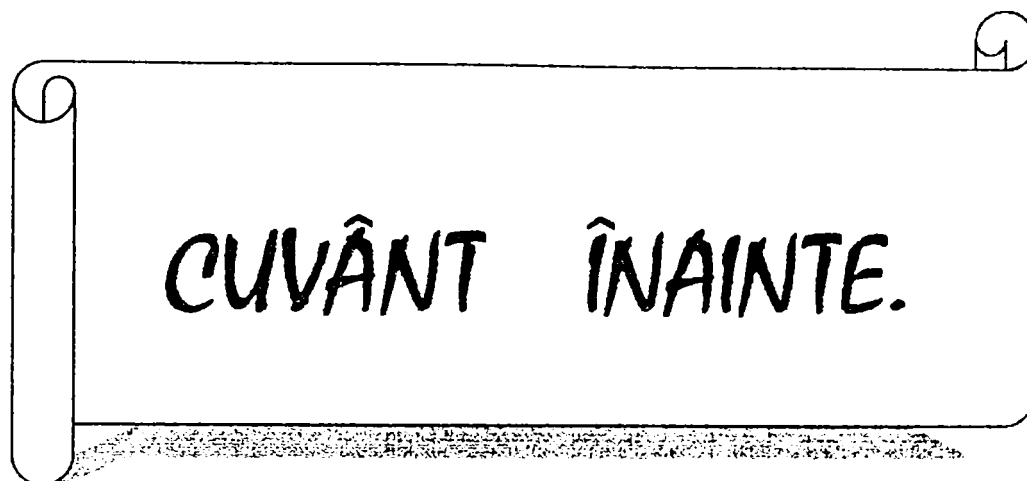
Timișoara, 2000
ROMÂNIA

CUPRINS

	Pag.
Cuvânt înainte	1
1. Introducere	4
2. De ce eroziunea electrică cu rupere de contact ? De ce aluminiul ?	8
3. Normalizarea terminologică și aplicativă a eroziunii electrice.	10
3.1. Considerații teoretice	10
3.2. Clasificarea variantelor de aplicare a eroziunii electrice.	14
3.3. Compararea normelor române și germane cu privire la terminologia și aplicarea industrială a eroziunii electrice.	18
4. Aluminiul metal al secolului.	32
4.1. Istoric.	32
4.2. Principalele domenii de utilizare a aliajelor de aluminiu.	33
4.3. Clasificarea aliajelor de aluminiu.	37
4.4. Aspecte privind prelucrabilitatea aliajelor de aluminiu.	40
4.4.1. Prelucrabilitatea prin așchiere.	40
4.4.2. Prelucrabilitatea prin abrazare.	43
4.4.3. Forfecarea.	44
4.4.4. Prelucrabilitatea cu energie termică.	45
4.4.5. Prelucrabilitatea prin tehnologii neconvenționale.	45
4.5. Debitarea aliajelor de aluminiu.	46
4.6. Analiza tehnico-economică a debitării aluminiului și a aliajelor lui.	48
5. Complexul mecanismelor fizice elementare participante la prelucrarea prin E.E.R.C.	54
5.1. Surse termice la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact.	54
5.2. Îndepărtarea de material prin efect Joule-Lenz.	61
5.2.1. Determinarea rezistenței de contact (R_c).	62
5.2.2. Determinarea timpului de existență a microcontactului.	72
5.3. Îndepărtarea de material prin arc electric nestaționar.	74
5.3.1. Localizarea spațială a descărcărilor prin arc electric nestaționar.	76

	Pag.
5.3.2. Localizarea temporară a descărcărilor în arc electric nestaționar.	78
5.3. Îndepărtarea de material prin descărcări electrice amorsate prin străpungerea mediului de lucru.	81
5.4. Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de abrazare.	82
5.4.1. Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de abrazare-tip rectificare.	83
5.4.2 Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de abrazare - tip lepuire.	84
5.5. Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de adeziune.	84
5.6. Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de forfecare.	85
5.7. Parametrii procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.	86
5.8. Factorii procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.	89
5.9. Modele care descriu global procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.	91
5.9.1. Modele experimentale ale procesului de prelucrare prin E.E.R.C.	92
5.9.2. Modele teoretice ale prelucrării prin E.E.R.C.	93
6. Utilaje de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact și echipamente de cercetare	95
6.1. Principii constructive ale utilajelor de prelucrare prin E.E.R.C.	95
6.1.1. Elemente determinante la conceperea utilajelor de prelucrare prin E.E.R.C..	95
6.1.2. Analiza comparativă a subsistemelor funcționale ale utilajelor de prelucrare prin E.E.R.C..	101
6.2. Echipamente utilizate la cercetarea experimentală.	105
7. Contribuții cu privire la modificarea transferului substanțial la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a aliajelor lui.	111
7.1. Strategia experimentală.	112
7.1.1. Experimentul o problemă esențială în domeniul ingineriei.	113
7.1.2. Strategii de experimentare în domeniul ingineriei.	119
7.1.3. Experimentul factorial privit ca experiment activ în construcția de mașini.	121
7.1.4. Software "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" utilizat pentru analiza, premodelarea, modelarea, optimizarea și conducerea proceselor tehnologice.	124
7.1.4.1. Procesul de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact propus ca sistem cibernetic.	124
7.1.4.2. Prezentarea Pachetului de Programe pentru modelare și optimizare statistică experimentală din sistemul "STATISTIC DATA SYSTEM 2000".	127

	Pag.
7.2. Programarea asistată a cercetării experimentale la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și aliajelor sale.	138
7.3. Cercetări experimentale.	140
7.3.1. Premodelarea experimentală.	140
7.3.2. Modelarea experimentală.	142
7.3.3. Rezultate experimentale.	148
7.4. Productivitatea prelucrării.	153
7.5. Uzura obiectului de transfer.	162
7.6. Rugozitatea suprafeței prelucrate.	171
8. Concluzii finale și contribuții originale.	179
8.1. Concluzii principale.	180
8.2. Contribuții originale.	183
Bibliografie	187



În viața fiecărui om există momente și perioade incandescente, explozive care conduc la hotărâri și decizii capabile să modifice substanțial cursul vieții. Un astfel de moment l-am trăit acum șase ani, când dintr-o dorință izvorâtă din nostalgia amintirilor plăcute ale anilor petrecuți la Politehnica Timișoreană, dar și din sesizarea necesității de a finaliza încă o etapă a pregătirii mele profesionale, am luat hotărârea de a reveni în Timișoara, lângă un om de excepție de care mă leagă sentimente profunde, de afecțiune și respect.

În scurt timp a devenit limpede că traducerea în viață a unei astfel de întreprinderi –teza de doctorat- este dificilă, reclamă înfruntări și sacrificii, pasiune.

Aceste constatări au fost împovărate prin solicitările zilnice, prin permanenta criză de timp, dar în special, prin distanța mare, uneori enormă care există între noi.

Am beneficiat însă de un sprijin competent și substanțial în unele momente de cumpănă.

Au fost momentele petrecute la Sibiu, momente transformate de multe ori, în perioade lungi, caracterizate prin confruntări științifice profunde, pentru mine deosebi de benefice. Au fost și multele ore petrecute în laboratoarele sibiene, unde datorită unei colegialități exemplare am putut utiliza întreaga dotare tehnică existentă și unde acumulările de cunoștințe au fost certe. Nu în ultimul rând menționez și momentele mai puțin plăcute, dar obligatoriu de depășit, ale etapelor de tehnoredactare, etape aproape imposibil de realizat în zona mea de reședință, dar care cu ajutorul colegiilor și prietenilor din Sibiu le-am putut depăși cu bine. Le mulțumesc.

Au fost și momentele petrecute în cadrul colectivului catedrei de Tehnologie mecanică din Timișoara.

Aici am întâlnit un colectiv de specialiști de excepție, preocupați nu numai pentru instrucția permanentă, sistematică și disciplinată din interiorul său, ci și pentru dezvoltarea unor valori spirituale și morale receptive la nou, dar acceptând rolul tradițiilor înaintate, proprii și universale. Confruntările de idei avute cu acest colectiv au fost pentru mine stimulente pentru depășirea limitelor apărute inerent, au

fost momente de sistematizare a unor concepte, au fost imboldul de filtra prin propria rațiune anumite principii și legități. Mulțumesc.

Sunt pătruns de o profundă emoție când trebuie să mă adresez celui care prin întreaga sa operă se dovedește insolubil legat de progresul școlii, științei și culturii românești, celui care cu devotament și pasiune și-a consacrat o parte din timp pentru a mă călăuzi pe întortocheatele căi ale cercetării științifice. L-am cunoscut acum 29 de ani, l-am cunoscut cu credința sa în valoarea școlii românești, l-am cunoscut cu remarcabilă intransigență de deschidere a noi orizonturi. Mi-am dorit atunci să ajung în apropierea sa. Mi-am îndeplinit această dorință. Mulțumesc.

Cele mai mari emoții le simt atunci când gândurile se îndreaptă spre cele cu care îmi împart viața, cele care prin devotament și sacrificiu mă fac să culeg multe clipe senine. Le adresez gânduri de respect și prietenie. Le mulțumesc.



INTRODUCERE.

În condițiile economiei de piață, într-o competiție industrială acerbă, accentuată puternic de posibilitățile oferite prin utilizarea instrumentelor informatice, produsele au o viață din ce în ce mai scurtă, necesitând a fi perfecționate și schimbate continuu. Pentru a face față exigențelor tot mai severe ale consumatorilor, fabricanții își concentrează preocupările în a produce mai ieftin, mai bine și mai repede.

În această competiție tehnologia își recâștigă titlul său de "motor al progresului tehnic". Ea este obligată la o evoluție continuu ascendentă, la identificarea și perfecționarea de multitudini de procedee și variante posibile și acordă cele mai mari șanse de câștig acelor care știu să o folosească mai bine, când și cum trebuie.

Utilajele de prelucrare au o pondere hotărâtoare în aceste demersuri tehnice, economice și manageriale. De aceea, pentru a asigura competitivitatea necesară utilajelor, constructorii lor trebuie să se subordoneze în totalitate cerințelor impuse, privind posibilitățile tehnologice, calitatea utilajului, costul și termenul de livrare.

Satisfacerea acestor cerințe complexe impune adoptarea soluțiilor optime în fiecare etapă, atât în cea de concepție cât și în cea de execuție a utilajului. Pentru o adaptare corectă și eficientă a soluțiilor optime se impune un studiu comparativ complex, în urma căruia să rezulte posibilitățile și particularitățile de utilizare a unor soluții, dovedite în exploatare ca fiind fiabile. Evident, în paralel cu aceste analize sunt necesare cercetări fenomenologice și tehnologice ample, care vor impune structura principială și performanțele utilajului.

Tehnologiile de prelucrare cu energii concentrate (tehnologiile neconvenționale) a materialelor și utilajele specifice acestor tehnologii au cunoscut și cunosc în ultimii ani un ritm deosebit de dezvoltare. Aceste tehnologii sunt în prezent din ce în ce mai mult aplicate la prelucrarea diferitelor organe de mașini, componente și aparate care lucrează în condiții deosebite de temperatură, presiune și viteze, respectiv sarcini foarte mari și care, în consecință, se execută din materiale dure și super-dure, super-rezistente și solicitate în condiții deosebite.

În paralel cu aceste aplicații crește considerabil aportul acestor noi tehnologii la prelucrarea organelor de mașini cu calități neobișnuite și anume, acolo unde aceste noi metode completează sau devin, în mod real, concurente tehnologiilor de prelucrare prin așchiere, ca urmare a creșterii preciziei de execuție și a productivității acestora.

Dintre procedeele metodei de prelucrare cu energii concentrate, procedeul de prelucrare prin eroziune electrică are utilizarea industrială cea mai largă, datorită atenției deosebite care a fost acordată cercetărilor fundamentale și aplicative. Se poate afirma că, acum, într-o serie de domenii (de ex: prelucrarea SDV-urilor) nu se mai poate concepe procesul tehnologic fără prelucrarea prin eroziune electrică.

Procedeele de prelucrare cu energii concentrate s-au impus și dezvoltat în ultima perioadă de timp, parcurgând rapid etapele corespunzătoare de la studiul procedului până la implemetarea industrială a lui, fiind într-o permanentă competiție cu alte procedee de prelucrare.

Dacă, din totalitatea procedeelelor de prelucrare cu energii concentrate atenția va fi îndreptată spre procedeul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC), se va putea constata că într-o perioadă relativ scurtă de 30...40 ani utilajele pentru prelucrarea prin acest procedeu au parcurs o evoluție spectaculoasă, începând de la utilaje simple convenționale adaptate prin modificări noului procedeu până la utilaje cu comandă autoadaptivă comandate cu microprocesoare.

Deoarece pentru finalizarea tezei de doctorat se impune efectuarea unui program de experimetare complex devine necesar conceperea unui stand de laborator specializat, care să asigure desfășurarea programului experimentat în bune condiții.

Cercetările efectuate până în prezent asupra procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact au evidențiat marea complexitate fenomenologică, cu multiple interferențe a mecanismelor elementare, care concură la îndepărtarea de material.

Cum, un proces tehnologic poate fi bine stăpânit și condus, numai cunoscând cele mai mici detalii fenomenologice, în special în domeniul tehnologiilor care uzează de un agent eroziv pentru

îndepărtarea de material, studiul mecanismelor elementare de îndepărtare de material capătă importanță primordială.

În cazul procedurii de prelucrare prin EERC, numărul cercetărilor asupra fenomenologiei procesului eroziv este destul de restrâns, în comparație cu cel al cercetărilor experimental-aplicative.

Aceasta, se datorește și faptului că lipsește "instrumentul" adecvat investigațiilor de intimitate a unui proces care se desfășoară în timpi extrem de scurți și în spații reduse, inaccesibile.

În vederea evitării acestui neajuns, foarte mulți cercetători recurg la analize teoretice, bazate pe cunoștințe din domenii conexe, care sunt verificate practic pe cale indirectă, prin caracteristicile tehnologice ale procedurii.

Mergând pe această cale, diverși cercetători au propus modele matematice sau experimentale, dependente de o mare varietate de factori și parametri. Toate aceste modele au urmărit, în esență, determinări sau evaluări ale unor parametri tehnologici, în special productivitatea prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact.

În acest context prezenta teză de doctorat și-a propus să abordeze toate aspectele legate de implementarea procesului de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a aliajelor lui.

Primul capitol încearcă să justifice necesitatea utilizării eroziunii electrice cu rupere de contact la debitarea aluminiului și a aliajelor lui, pornind de la unele avantaje principiale ale debitării prin EERC și subliniind importanța industrială tot mai mare a aliajelor de aluminiu, cu o pondere însemnată în ceea ce privește „dificultățile“ de prelucrare, în special cele de debitare. Coroborând avantajele debitării prin eroziune electrică cu rupere de contact, avantaje care se suprapun în mod fericit peste deficiențele și limitele prelucrării aliajelor de aluminiu, cu aspectele tehnologice ale debitării aliajelor de aluminiu, s-a reușit identificarea unei „simbioze“ interesante, cu rezultate tehnologice remarcabile.

În capitolul 2 este motivată obiectiv și subiectiv abordarea prelucrării prin EERC și aplicarea ei la debitarea aluminiului și aliajelor lui.

În continuare (capitolul 3) se localizează poziția prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact în cadrul metodei de prelucrare prin eroziune, în general și în cadrul procedurii de prelucrare prin eroziune electrică, în special. Pentru aceasta se recurge la un studiu comparativ între normele tehnice românești (STAS 12640/88) și cele germane (VDI 3402, VDI 3400) referitoare la prelucrarea prin eroziune electrică. Se constată că, norma românească este corectă, dar sumar întocmită, impunându-se o dezvoltare și diversificare a ei.

Capitolul 4 conține o prezentare sintetică a aluminiului și a posibilităților de prelucrare a lui. Sunt prezentate câteva date istorice, mai importante, o privire de ansamblu asupra domeniilor de utilizare a aluminiului și a aliajelor lui, cât și o analiză a posibilităților de prelucrare (prin procedee convenționale și neconvenționale) a acestora. La sfârșitul capitolului este propusă o metodă de identificare a procedurii de debitare optim, ținând cont de anumite condiții concrete și necesități.

În capitolul 5 este analizat mecanismul fizic al prelucrării prin EERC. O atenție mare este acordată surselor electrotermice, care conduc la îndepărtarea de material la suprafața obiectului supus prelucrării – contactul electric și arcul electric nestaționar; sunt abordate însă și sursele mecanice – abrazarea, forfecarea, etc.

Capitolul 6 este divizat în două părți distincte. Prima parte detaliază principial structura unui utilaj de prelucrare prin EERC și în urma unor studii comparative a multor utilaje și standuri experimentale, se întocmește o sinteză cu privire la posibilitățile de realizare a principalelor subansamble componente, lăsând, evident loc și pentru alte soluții posibile. În a doua parte sunt prezentate, sumar toate echipamentele utilizate la cercetarea experimentală.

Și capitolul 7, consacrat cercetărilor experimentale este divizat în două părți distincte. În prima parte se efectuează o analiză principială a metodelor de experimentare factoriale de ordinul I și de ordin superior insistându-se, în special asupra modurilor de aplicare a metodei, a avantajelor utilizării ei și asupra tehnicilor de interpretare corectă a rezultatelor. A doua parte a acestui capitol este destinată prezentării cercetărilor experimentale efectuate. Sunt analizate principalele funcții obiectiv ale debitării prin EERC și anume: productivitatea prelucrării, uzura obiectului de transfer și calitatea suprafețelor prelucrate. În urma acestor cercetări se poate conchide că debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a aliajelor lui este un procedeu deosebit de productiv, cu un cost foarte redus și care poate asigura, în anumite condiții tehnologice și de utilizare ulterioară, chiar suprafețe care să nu mai pretindă prelucrări ulterioare. Ca urmare a acestui fapt și a facilității cu care se realizează debitarea este avansată, ideea că prelucrarea prin EERC este una din metodele cu avantaje deosebite pentru debitarea aluminiului și a aliajelor lui.

Ultimul capitol sintetizează pe de o parte principalele concluzii desprinse în urma ansamblului de cercetări efectuate în cadrul tezei de doctorat și pe de altă parte prezintă sistematizat principalele contribuții originale care completează informațiile și cunoștințele din domeniul prelucrării materialelor prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC).

2. DE CE EROZIUNEA ELECTRICĂ CU RUPERE DE CONTACT? DE CE ALUMINIUL ?

Se pune firesc întrebarea formulată în titlul acestui capitol. Care sunt motivele care au condus la abordarea și finalizarea temei referitoare la debitarea prin EERC a aluminiului și a aliajelor lui ?

Partea substanțială a acestei alegeri este de natură subiectivă.

O mare parte din activitatea mea profesională am desfășurat-o, atât în România, cât și în Germania în unitățile economice, în care aluminiul și aliajele lui au avut sau au o pondere însemnată. Am cunoscut marile avantaje care le asigură acest metal, dar și dificultățile și limitele în prelucrarea lui. Am avut preocupări continue de depășire a acestor dificultăți și limite.

La abordarea acestei forme de pregătire superioară –teza de doctorat – nu am crezut că voi parcurge această cale. Numai în urma studiilor întreprinse cu ocazia pregătirilor am luat cunoștință de varianta prelucrării materialelor metalice prin eroziune electrică cu rupere de contact. Am fost fascinat de posibilitățile tehnologice care le oferă. Căutând materiale bibliografice în zona mea de activitate actuală am avut neplăcuta surpriză de a nu găsi nici un material dedicat acestui procedeu.

Am avut însă sprijinul colegilor și prietenilor din Sibiu, care cu mult altruism mi-au pus la dispoziție toată cercetarea bibliografică efectuată acolo, timp de mulți ani; mi-au pus la dispoziție laboratoarele bine dotate pentru cercetarea acestui procedeu și nu în ultimul rând mi-au pus la dispoziție „cunoștințele“ lor acumulate pe parcursul a peste 20 de ani, de cercetare a procedului. Și astfel, din aproape în aproape, s-a conturat acest nou domeniu de aplicare a eroziunii electrice cu rupere de contact sau acest nou procedeu pentru debitarea aluminiului și a aliajelor lui.

Din punct de vedere obiectiv, o primă privire asupra debitării aluminiului și a aliajelor lui ar conduce la concluzia că procedeele cunoscute și aplicate până acum asigură o rezolvare completă a problemei. Intrând însă în intimități tehnologice și energetice se pot identifica o multitudine de limite sau aspecte care sunt depărate de o rezolvare apropiată de optim a debitării.

Prin aplicarea prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact, la debitarea aluminiului și a aliajelor lui se pot reduce în primul rând timpii necesari efectuării acestei operații. timpii reduși determinați de productivitatea deosebită a procedului (mii de mm³, în unitatea de timp- minut), iar în al doilea rând, în corelare cu primul, a lățimii foarte mici a tăieturii determinată de grosimea mică cu care poate fi realizată „scula“. Rezultă în aceste condiții o concentrare energetică intensă care face ca procedeul (aplicat la debitarea aluminiului și a aliajelor lui, dar nu numai) să devină foarte eficient.

Complectând acest avantaj deosebit cu cel al prețului de cost foarte redus pentru „sculă“, rezultă în ansamblu un procedeu optim pentru operațiile de debitare, operații de obicei primare.

În cazul special al debitării prin EERC a aluminiului și a aliajelor lui s-a putut constata că pentru anumite domenii ale parametrelor de reglare rezultă suprafețe prelucrate care pot fi utilizate practic, fără alte intervenții, depășindu-se în acest fel posibilitățile de utilizare a procedului.

Prezenta lucrare nu și-a propus să elucideze complet debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact a aliajelor de aluminiu. Din acest motiv nu au fost utilizate mai multe feluri de aliaje pe bază de aluminiu ci s-a utilizat un aliaj de tip duraluminiu (Al-Cu-Mg-Mn).

Este posibil ca diferitele elemente de aliere, uzuale aliajelor de aluminiu cât și cantitatea lor să determine comportări diferite față de procesul prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC). De altfel, cele câteva experimentări efectuate în această direcție au evidențiat un comportament diferit la debitarea prin EERC (diferențele nu au fost prea mari).

Deoarece acest aspect nu a fost experimentat exhaustiv, rezultatele sunt doar calitative, pentru obținerea unor informații cantitative și detaliate fiind necesară o continuare a cercetărilor.



3. NORMALIZAREA TERMINOLOGICĂ ȘI APLICATIVĂ A EROZIUNII ELECTRICE.

3.1. Considerații teoretice.

Metoda de prelucrare dimensională prin eroziune, definită, [57], ca un proces de distrugere a integrității straturilor de suprafață ale obiectului supus eroziunii prin acțiuni determinate de un agent eroziv, face parte integrantă din grupa numită "tehnologii de fabricație" din ansamblul acțiunilor de transformări fizico-chimice efectuate asupra substanței.

Conform DIN 8580, [132], tehnologiile de prelucrare sunt grupate în patru acțiuni posibile a fi efectuate asupra substanței (fig.3.1).

Dintre cele patru acțiuni posibile, de interes pentru industria constructoare de mașini este acțiunea de prelucrare, înțeleasă ca fiind determinată de totalitatea intervențiilor asupra substanței care conduc la modificări ale formei. Aceste acțiuni se aplică substanței prin tehnologiile de prelucrare, care pot fi grupate [57], [60], [92], [132], în trei grupuri de metode tehnologice (fig.3.2).

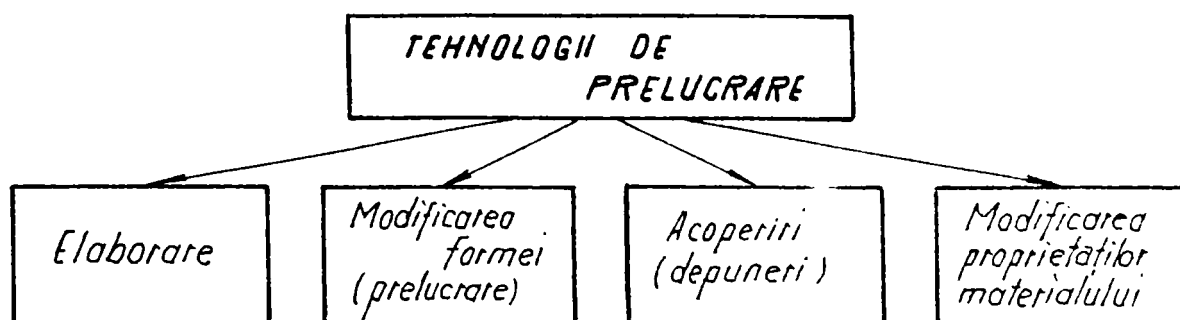


Fig.3.1. Acțiuni posibil a fi efectuate asupra substanței (după DIN 8580).

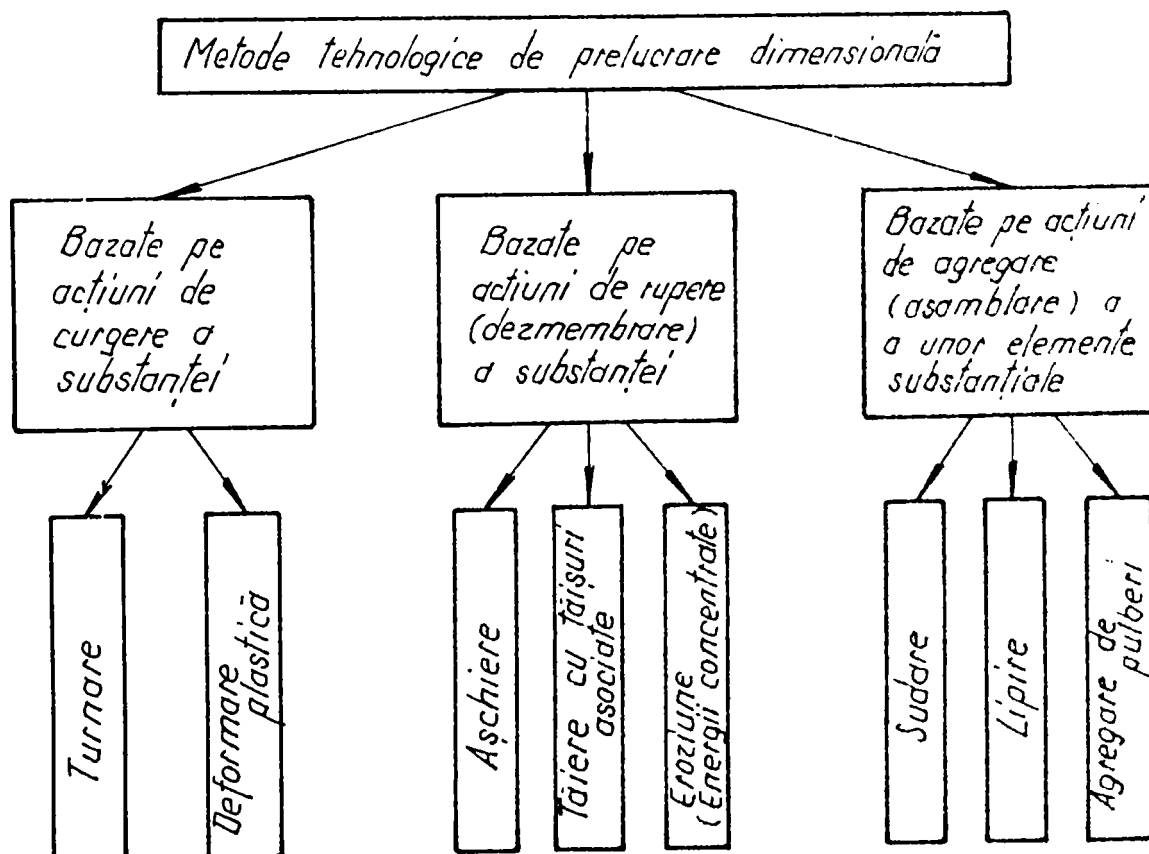


Fig.3.2. Metode tehnologice de prelucrare dimensională utilizate în construcția de mașini.

În cadrul grupului de metode bazate pe acțiuni de rupere (dezmembrare) a substanței, un loc aparte îl ocupă metoda de prelucrare prin eroziune.

Se știe că la această metodă acțiunea asupra substanței este realizată prin acțiunea directă și dinamică a unui agent eroziv.

Prin agent eroziv, se înțelege un sistem fizico-chimic complex capabil să cedeze energie sistemelor ambiante. Agentul eroziv are deci rolul de transformare a unei energii primare, de obicei de natură electrică, în energie de efect, care conduce la distrugerea integrității straturilor superficiale ale obiectului supus prelucrării. Energia de efect a agentului eroziv se manifestă la suprafața obiectului prelucrării prin acțiuni de regulă natură fizică (termică, mecanică) sau de natură chimică dar pot fi utile și alte naturi ale acestor energii. (fig.3.3).

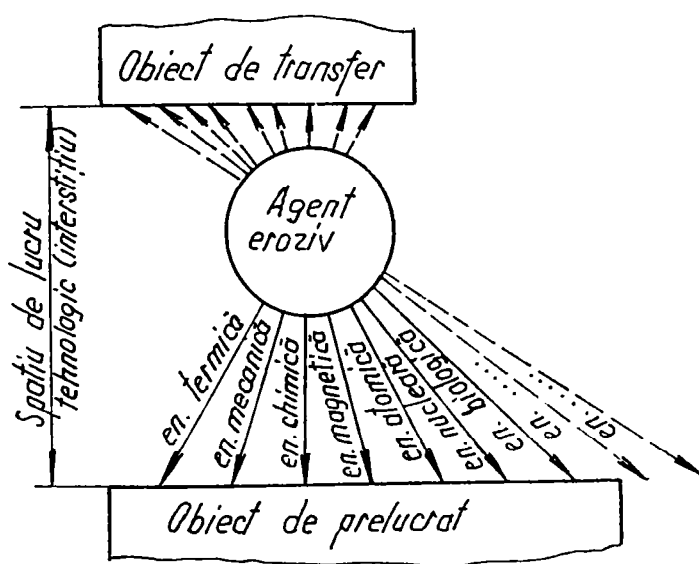


Fig.3.3. Acțiunea agentului eroziv cu obiectul supus prelucrării.

Repartiția spațială a agentului eroziv în raport cu obiectul supus prelucrării, presupune existența unui sistem cu rol de formare finală și poziționare. În cadrul acestuia corpul solid cu rol de element de ieșire în procesul de transfer al energiei distructive - numit obiect de transfer (O.T.) - are o importanță tehnologică deosebită, deoarece prin forma, construcția și poziția sa în raport cu obiectul prelucrării este principalul purtător de informație asupra stării finale a agentului eroziv.

Repartiția temporară a agentului eroziv este condiționată, în principal, de condiția acțiunii sale superficiale asupra obiectului supus prelucrării. În cazul unei repartiții continue a agentului eroziv interacțiunile acestuia cu obiectul prelucrării devin volumice și energia distructivă nu va mai putea depăși energia de legătură din materialul obiectului prelucrării.

Realizarea proceselor de prelucrare cu energii concentrate (prin eroziune), devine posibilă numai dacă energia transmisă de agentul eroziv spre obiectul prelucrării, permite energie distructivă, este mai mare decât energia de legătură a particulelor din straturile superficiale ale obiectului supus eroziunii.

Repartiția spațială și l-temporară a agentului eroziv este o condiție esențială pentru realizarea unei prelucrări corecte.

Natura energiei distructive transmisă de agentul eroziv spre obiectul supus prelucrării determină mecanismul elementar al distrugerii erozive și se manifestă prin unul din următoarele fenomene de bază sau combinații ale acestora:

- topire, vaporizare, sublimarea unor volume elementare de material afectate de acțiunea agentului eroziv;
- ruperi de material în straturile de suprafață ale obiectului supus prelucrării, ca urmare a unor acțiuni termice și mecanice repetate;
- coroziunea.

Din cele prezentate se desprinde una dintre principalele caracteristici ale metodei de prelucrare cu energii concentrate (prin eroziune). Aceasta se referă la contactul mecanic nemijlocit dintre cele două obiecte în interacțiune (sculă - obiect de prelucrat) propriu metodelor de prelucrare convențională.

În cazul prelucrărilor cu energii concentrate (prin eroziune) nu există un contact mecanic nemijlocit între două obiecte rigide, contactul nemijlocit al obiectului supus prelucrării are loc numai cu agentul eroziv. După cum s-a arătat, rolul celui de-al doilea element rigid din sistem (primul este obiectul supus prelucrării) - obiectul de transfer - are doar un rol pasiv de localizare spațial-temporară a agentului eroziv.

Dacă pentru prelucrările cu energii concentrate (prin eroziune) se încearcă o asimilare a noțiunilor proprii metodei de prelucrare prin așchiere atunci noțiunii de "sculă" trebuie să i se atașeze noțiunea de "agent eroziv", adică "scula" prin intermediul căreia se realizează îndepărtarea de material la prelucrarea cu energii concentrate (prin eroziune) este agentul eroziv.

Față de această proprietate deosebită a metodei de prelucrare prin eroziune este necesară evidențierea unor procedee sau variante de aplicare a unor procedee care sunt caracterizate contact mecanic nemijlocit între cele două obiecte rigide. Cu toate acestea îndepărtarea de material are loc totuși prin acțiunea unui agent eroziv, ca efect de cauzalitate al contactului mecanic.

Celelalte caracteristici ale metodei de prelucrare cu energii concentrate (prin eroziune) sunt determinate de lipsa contactului mecanic nemijlocit între cele două obiecte rigide în interacțiune și de faptul că îndepărtarea de material la suprafața obiectului supus prelucrării, este o consecință a energiei distructive transmisă de agentul eroziv. Dintre aceste caracteristici comune metodei principale sunt:

- influența proprietăților mecanice ale materialului obiectului supus prelucrării asupra caracteristicilor tehnologice sunt, cu o singură excepție, de ordin secundar;
- cinematica generării suprafețelor prelucrate este, în principiu foarte simplă, de regulă nefiind necesare decât mișcări liniare;

- simultan cu modificarea formei obiectului de prelucrat au loc și modificări ale proprietăților materialului în straturile adiacente prelucrării ale obiectului de prelucrat (în unele cazuri aceste modificări conduc la îmbunătățirea proprietăților de utilizare ale pieselor);
- posibilitatea facilă de automatizare, determinată de natura majoritar electrică a energiei primare.

Procedeele sau variantele de aplicare a lor la care este necesar contactul mecanic nemijlocit între cele două obiecte rigide sunt de exemplu prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, prelucrarea prin eroziune electrică complexă electrică-electrochimică.

În funcție de natura agentului eroziv normele germane DIN 8580 grupează procedeele care compun metoda în trei grupe (fig.3.4).

De remarcat, că spre deosebire de optica îmbrățișată de cercetătorii din România, [57], [92], normele germane nu includ în cadrul metodei de prelucrare prin eroziune procedeele de prelucrare abrazivă și cavitațională, care în DIN 8580, [132], sunt cuprinse în cadrul metodei de prelucrare prin așchiere.

3.2. Clasificarea variantelor de aplicare a eroziunii electrice.

În general, prin eroziune electrică se înțelege erodarea locală la suprafața a doi electrozi ca urmare a unei descărcări electrice între aceștia. Condițiile fizice care se impun în vederea desfășurării prelucrării prin eroziune electrică pot fi grupate în următoarele: , [14], [60], [92],

- introducerea directă a energiei electrice la suprafața obiectului de prelucrat. Pentru satisfacerea acestei condiții se impune utilizarea unor materiale electroconductoare pentru obiectul de prelucrat și pentru cel de transfer (electrod-sculă), conectarea acestora la tensiunea sursei de alimentare și realizarea condiției necesare amorsării descărcării în mediul de lucru;
- dozarea temporară în impuls a energiei electrice în zona de interacțiune electrod-agent-obiect. Condiția este necesară pentru a se localiza acțiunea energiei de efect și pentru a se dirija prin acest mijloc prelevarea de material. La dozări continue a energiei electrice, efectul termic al descărcării se propagă treptat în întregul volum al obiectului de prelucrat și prelevarea nu mai poate fi localizată. Din această cauză durata descărcărilor se limitează la valori sub 10^{-1} sec.;

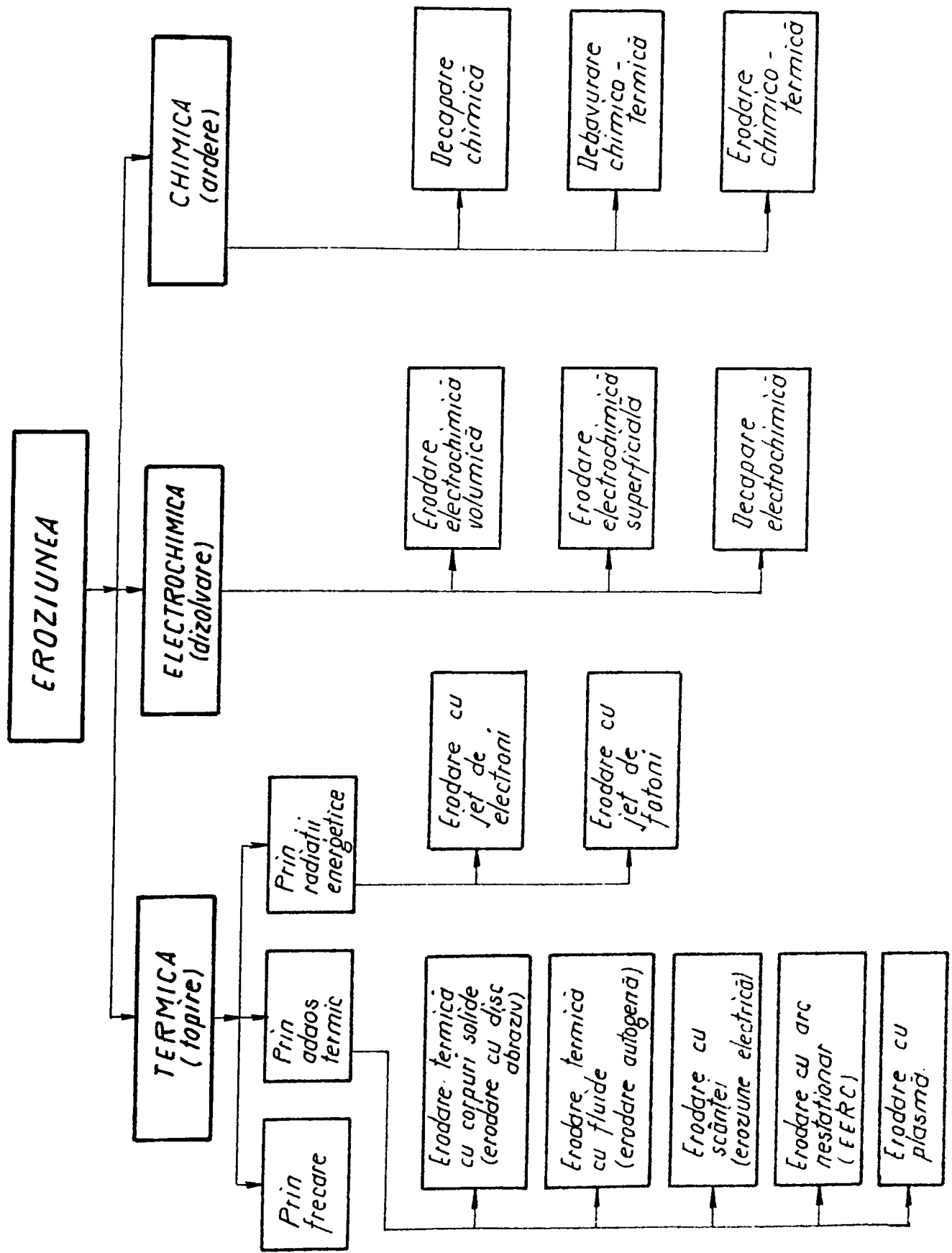


Fig.3.4. Procedeele metodei de prelucrare prin eroziune.

- asigurarea unui caracter polarizat al descărcărilor electrice în impuls. Sub acțiunea efectului termic al descărcării electrice în impuls, se va preleva material, atât la suprafața obiectului de prelucrat cât și la suprafața celui de transfer (electrodului-sculă). Scopul urmărit este ca prelevarea la suprafața obiectului de prelucrat (productivitatea) să fie mult mai mare față de cea la suprafața electrodului sculă (uzura volumică să fie cât mai mică). Fenomenul se poate dirija prin: conectarea obiectului de prelucrat și a electrodului-sculă la polaritățile corespunzătoare ale sursei de alimentare cu energie electrică, prin confecționarea electrodului-sculă din materiale cu rezistențe erozive mari și formarea pe acesta a unor pelicule protectoare față de acțiunea descărcărilor electrice în impuls;
- restabilirea continuă a stării inițiale în spațiul eroziv. Aceasta pentru ca descărcările să se poată repeta în timp în condiții practic identice, respectând principiul selectivității. Pentru realizarea condiției este necesară asigurarea unei evacuări eficiente a produselor eroziunii și restabilirea distanței de amorsare a descărcărilor dintre obiectul de prelucrat și cel de transfer (electrodul-sculă).

Prin respectarea acestor condiții este posibil ca o formă spațială oarecare, pe care o are electrodul-sculă caracterizat prin (3.1):

$$F_{ES} = F_{ES}(x_1, y_1, z_1) \quad (3.1)$$

să fie reprodusă la nivelul obiectului de prelucrat, forma reproducerii caracterizându-se prin (3.2):

$$F_{OP} = F_{OP}(x_2, y_2, z_2) \quad (3.2)$$

La finele operației de reproducere, forma electrodului sculă este modificată, datorită acțiunii descărcărilor electrice care acționează și în direcția lui. Forma finală a electrodului-sculă poate fi descrisă prin (3.3):

$$F_{ES} = F_{ES}(x'_2, y'_2, z'_2) \quad (3.3)$$

În aceste situații poate fi definită condiția de reproductibilitate a prelucrării prin eroziune electrică (3.4):

$$F_{OP} = kF_{ES} = k'F_{ES} \quad (3.4)$$

Condiția de reproductibilitate trebuie înțeleasă calitativ, coeficienții k și k' fiind coeficienți de corecție (subunitari) care relevă existența interstițiului eroziv (k), respectiv rezistența la eroziune a materialului din care este confecționat electrodul-sculă (k').

Această condiție conduce la o cerință tehnologică importantă: "precizia execuției electrodului-sculă condiționează precizia geometrică a prelucrării la nivelul obiectului de prelucrat"

Din analiza condițiilor impuse prelucrării prin eroziune electrică rezultă cele două variante principale ale procedurii:

Eroziunea electrică cu impulsuri amorsate prin străpungerea interstițiului (a mediului de lucru).

Varianta este caracterizată prin lipsa contactului nemijlocit între obiectul de prelucrat și electrodul sculă. Dimensiunea interstițiului eroziv este menținută constant la o valoare adecvată prin intermediul sistemului de avans automat indispensabil utilajelor, dimensiune care, în funcție de condițiile de lucru și de parametrii de reglare, variază între 0,01 și 0,5mm. [11].

În momentul conectării celor două obiecte la sursa de alimentare cu energie electrică, spațiul izolator format de lichidul dielectric din interstițiu va fi străpuns rezultând descărcare în impuls a cărei energie se transformă preponderent în energie termică și mecanică. Componenta termică a energiei este așa de mare încât conduce la topiri și vaporizări locale ale materialului obiectului de prelucrat, iar componenta mecanică determină expulzarea acestor faze fluide cu formarea unor cratere specifice la suprafața obiectului de prelucrat. Succesiunea selectivă a acestor selectări conduce la formarea multiplă de cratere, repartizate uniform pe toată suprafața în interacțiune a celor două obiecte (obiectul de prelucrat - electrodul-sculă);

Eroziunea electrică cu impulsuri amorsate prin ruperea unor microcontacte electrice.

În [4], această variantă este prezentată ca fiind cea care stă la baza procedurii de prelucrare prin eroziune electrică. Identificată din punct de vedere al efectelor posibile încă din 1770 de cercetătorul englez Priestley ea este menționată în 1944 de cercetătorul rus Lazarenko care o aplică efectiv pentru "prelevarea" de material.

625.876/181E

La această variantă descărcarea electrică are naștere prin realizarea periodică a unor contacte, care vor fi întrerupte prin mișcări relative între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer. În urma întreruperii contactelor electrice este amorțată o descărcare electrică în impuls, care formează la suprafața obiectului de prelucrat o "pată termică" de cca. 10^{-1} mm^2 cu o densitate energetică maximă de aproximativ 1 KW/mm^2 . [11]. Această variantă este aplicată în special la operații de debitare.

Având aceeași cauză pentru prelevarea de material ca și prima variantă a eroziunii electrice este normal ca toate (sau aproape toate) noțiunile identificate la eroziunea electrică cu descărcări amorțate prin străpungerea mediului dielectric să fie transmisibile spre eroziunea electrică cu rupere de contact.

3.3. Compararea normelor române și germane cu privire la terminologia și aplicarea industrială a eroziunii electrice.

La ora actuală prelucrarea prin eroziune electrică este procedeul cu cea mai largă utilizare industrială. Acest lucru se datorează faptului că, în general, studiul fenomenologic a reușit elucidarea majorității aspectelor mecanismului fizic (există însă totuși și detalii care mai necesită cercetări), pe de o parte, iar pe de altă parte construcția utilajelor a atins performanțe foarte înalte, în pas cu cele atinse de utilajele destinate prelucrărilor convenționale (comenzi autoadaptive, centre de prelucrare etc.).

Acesta este motivul pentru care procedeul este pe cale să părăsească grupul tehnologiilor numite generic "neconvenționale" și să pătrundă în cel al tehnologiilor cu aplicativitate curentă

Semnificativ, în acest sens, este faptul că încercările de normalizare în cadrul tehnologiilor de prelucrare cu energii concentrate sunt îndreptate exclusiv spre procedeul de prelucrare prin eroziune electrică (în România) și spre procedeele de prelucrare prin eroziune electrică, respectiv electrochimică (în Germania). În România STAS 12640/88, [133], reglementează terminologia utilizată în cadrul prelucrărilor prin eroziune electrică, iar în Germania VDI-Richtlinien-3400 și VDI-Richtlinien-3402 [134], [135], reglementează aspecte privind terminologia, noțiunile de bază, procedeul și domeniile de utilizare.

Între cele două norme există foarte multe puncte de vedere identice, dar există și anumite aspecte care nu sunt în concordanță. Din acest motiv se consideră oportună o analiză comparativă a unor noțiuni de bază cuprinse în cele două norme (Tabelul 3.1).

Tabelul 3.1.

Nr. crt.	Noțiunea	STAS 12640/88	VDI 3402(VDI 3400)
1.	Definiția	Electroeroziunea este procedeul de prelucrare a materialelor conducătoare de electricitate bazat pe efectul eroziv al descărcărilor electrice în impulsuri amorsate între doi electrozi (piesă și sculă), separați de un fluid dielectric.	Electroeroziunea (eroziunea-electrică, EDM- Electrical Discharge Maching) cuprinde erodarea provocată de procesele de descărcare electrică între doi electrozi (obiect de prelucrat, electrod-piesă, electrod-sculă, sculă) într-un mediu de lucru în scopul prelucrării.
2.	Clasificare		<p>1. <u>Eroziunea electrică cu scânteii</u> (eroziunea electrică, erodarea cu scânteii, prelevarea cu scânteii) este caracterizată prin faptul că prelevarea este determinată de descărcări electrice (scânteii) separate spațial și temporar, nestaționare sau cvazistaționare.</p> <p>2. <u>Eroziunea electrică cu rupere de contact</u> (erodarea cu arc electric, prelevarea cu arc electric) este caracterizată prin faptul că prelevarea este determinată de descărcări electrice (arcuri electrice) staționare, separate spațial și temporar. Amorsarea descărcărilor se produce preponderent prin contacte mecanice între electrozi care prin vibrații axiale a electrodului sculă se întrerup periodic.</p>
3.	Domenii de utilizare	<p>Conform fig.3.5</p> <p>Copiere. Operație de transpunere în piesă a unei forme spațiale, conjugate celei descrise de un electrod aflat în mișcare relativă față de piesă.</p> <p>Imprimare. Operație de copiere prin care se realizează în piesă o cavitate, sau o gaură străpunsă, având profilul conjugat părții active frontale a electrodului.</p> <p>Generare. Operație de copiere prin care se realizează în piesă o formă spațială, obținută prin deplasarea pe o traiectorie a unui electrod având un profil generator elementar.</p> <p>Tăiere. Operație de desprindere a unei părți dintr-un semifabricat, cu ajutorul unui electrod sub formă de bandă, lamă, sârmă sau disc.</p> <p>Decupare. Operație de tăiere a unei părți</p>	<p>Copierea prin eroziune electrică cuprinde toate procedeele de prelucrare la care mișcarea relativă între obiectul de prelucrat și electrodul sculă coincide cu mișcarea de avans. Este posibilă suprapunerea unei mișcări relative (vibrație sau pulsație). Mișcarea relativă poate fi produsă fie de electrodul sculă, fie de obiectul prelucrării. Se disting găurirea prin eroziune electrică și gravarea prin eroziune electrică.</p> <p>Găurirea prin eroziune electrică cuprinde procedeele de prelucrare cu străpungerea obiectului de prelucrat, prelucrarea putând avea secțiune constantă sau variabilă.</p> <p>Gravarea prin eroziune electrică cuprinde procedeele de prelucrare pentru obținerea unor cavități spațiale.</p> <p>Tăierea prin eroziune electrică cuprinde toate procedeele de prelucrare la care obiectele de prelucrat sunt debitate, decupate sau incizate. Se disting tăierea cu lamă, cu sârmă respectiv bandă și cu disc rotitor.</p> <p>Rectificarea prin eroziune electrică cuprinde</p>

Nr. crt.	Noțiunea	STAS 12640/88	VDI 3402(VDI 3400)
		de o anumită formă și mărime dintr-un semifabricat, utilizând un electrod de sârmă sau bandă. Debitare. Operație de tăiere a unui semifabricat în părți mai mici, suprafața tăieturii fiind de obicei plană.	toate procedeele la care mișcarea relativă între obiectul de prelucrat și electrodul-sculă nu coincide cu mișcarea de avans. Se disting rectificarea plană și circulară cu și fără profil.

Din analiza comparativă, numai a aspectelor diferite din cadrul celor două norme se poate constata încă de la început existența unei îngrădiri puternice pe care STAS 12640/88 o realizează asupra denumirii procedurii și asupra celor două obiecte aflate în interacțiune.

În continuare VDI 3402 (VDI 3400) efectuează o clasificare a variantelor de aplicare a procedurii, incluzând în mod normal și prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact (E.E.R.C.).

Sunt de remarcat o serie de afirmații incorecte în definirea variantei E.E.R.C. cum ar fi afirmația că prelevarea de material are loc prin descărcări electrice staționare (afirmație exclusivă) și că amorsarea descărcărilor are loc prin ruperea contactelor numai datorită vibrațiilor axiale pe care le execută electrodul-sculă.

Referitor la varianta prelucrării prin E.E.R.C. trebuie făcută precizarea că, definițiile și terminologia specifică este identică cu cele ale eroziunii electrice cu descărcări amorsate prin străpungerea mediului dielectric.

În ceea ce privește terminologia utilizată, care se referă la domeniile de utilizare ale eroziunii electrice se remarcă o diferențiere formală între cele două norme, dar în esență se pot identifica domenii de utilizare identice.

Totuși, prin gruparea distinctă a procedurilor de prelucrare la care între obiectul supus prelucrării și electrodul sculă există o mișcare relativă, alta decât cea de avans, VDI 3402 (VDI 3400) este mai acoperitor, ținând cont și de faptul că acest gen de prelucrări prin eroziune electrică capătă o extindere din ce în ce mai mare.

Privitor la denumirea acestui ultim grup de procedee, termenul utilizat de STAS 12640/88 - generare - este mai elocvent în comparație cu termenul utilizat de VDI 3402 (VDI 3400) - rectificare - chiar dacă în definirea termenului de "generare" se consideră numai posibilitatea mișcării unui electrod-sculă după o anumită traiectorie, neținându-se cont că generarea poate avea loc și prin mișcarea obiectului de transfer sau a mișcării concomitente a ambilor electrozi.

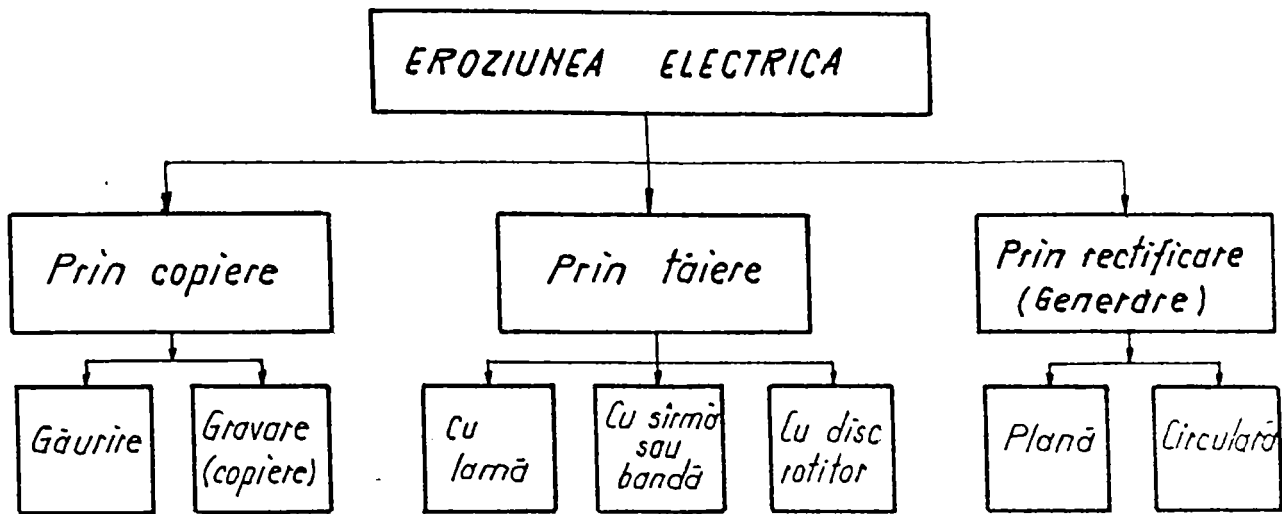


Fig.3.5. Domeniile de utilizare ale eroziunii electrice conform VDI-3402.

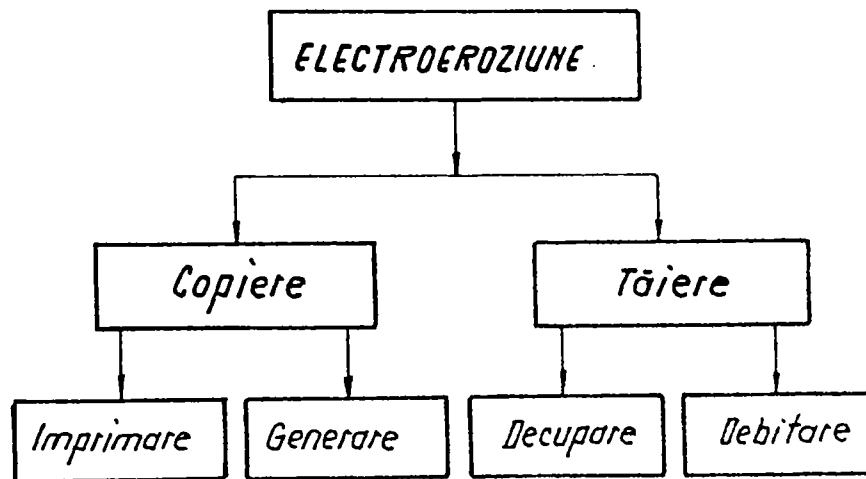


Fig.3.6. Domeniile de utilizare ale eroziunii electrice conform STAS - 12640 - 88.

Normele VDI 3402 (VDI 3400) însoțesc definirea termenilor analizați cu figuri explicative în timp ce STAS 12640/88 nu cuprinde explicații.

În continuare cele două norme conțin definirea termenilor referitori la utilajul de prelucrare, tehnologia de prelucrare, la generatoarele de impulsuri și cele referitoare la caracteristicile

impulsurilor. Această parte este laconic prezentată în STAS 12640/88 cu menționarea denumirii, a simbolului, a unităților de măsură și a definirii termenului. Se face uz de trei figuri reprezentând interstițiul de lucru (frontal, lateral, unghiular), uzura liniară a electrodului sculă și forma impulsurilor (cu principalele caracteristici) pentru generatoarele cu impulsuri comandate.

În normele VDI 3400 și VDI 3402 partea referitoare la terminologia privind utilajul de prelucrare, tehnologia de prelucrare, la generatoarele de impulsuri este prezentat într-o formă largă cu foarte multe figuri explicative și exemplificative. Se recurge la clasificări și subclasificări care oferă o imagine clară asupra posibilităților pe care le are prelucrarea prin eroziune electrică, iar prin exemplele de utilizare normele devin ușor de utilizat, chiar și pentru nespecialiști în domeniu. Spre exemplificare se prezintă tabelul 3.2 cuprinzând exemplificarea domeniilor de utilizare ale eroziunii electrice și tabelul 3.3 cuprinzând posibilitățile de execuție a electrozilor-sculă pentru prelucrarea prin eroziune electrică.

Tabelul 3.2.

Copierea prin eroziune electrică			
Găurire prin eroziune electrică		Gravarea prin eroziune electrică	
<i>Domeniul SDV</i>	<i>Domeniul productiv</i>	<i>Domeniul SDV</i>	<i>Domeniul productiv</i>
Duze Bucșe de ghidare Lere Forme pentru presare Matrițe Plăci tăietoare Matrițe pentru extrudare Matrițe pentru tragere	Duze Componente electronice Arcuri Elemente hidraulice Magneți Palete pentru turbine Subansamble	Cochilii Matrițe de ambutisare Matrițe pentru forjare Elemente componente Ștanțe Matrițe pentru turnare sub presiune Matrițe pentru injectat materialele macromoleculare Scule pentru extrudare	Elemente hidraulice Palete pentru turbine Marcare semifabricate

Este evident faptul, că domeniile de utilizarea ale eroziunii electrice prezentate în tabelul 3.1 sunt doar câteva exemple, în realitate posibilitățile de aplicare ale eroziunii electrice sunt mult mai largi.

Tabelul 3.3.

Tăierea prin eroziune electrică		Gravarea prin eroziune electrică	
Domeniul SDV	Domeniul productiv	Domeniul SDV	Domeniul productiv
Semifabricate	Componente semiconductori Corpuri pentru controlul calității	Scule așchietoare Bucșe ghidare Lere pentru filete Matrițe pentru calibrare Matrițe pentru deformări plastice Electrozi-sculă profilați Plăci și poansoane pentru ștanțe Matrițe pentru tragere	Duze Căi de ghidare Arcuri Filete Miezuri magnetice Palete pentru turbine Roți dințate

Tabelul 3.4.

Procedeul		Observații
Elaborare Galvano-plastie		Pentru realizarea electrozilor sculă cu pereți subțiri; stabilitatea formei se realizează prin nervurări interioare. Formele și modelele inițiale din material oarecare se pot obține și prin deformare.
Turnare	Conform tuturor procedeelor cunoscute de ex. turnarea în cochilă cu sau fără presiune, turnare de precizie. Turnare sub presiune.	Ulterioară în vederea creșterii densității materialului și/sau pentru corectarea formei și dimensiunilor. Electrozi-sculă uzați pot fi retopiți.
Injectie	În forme metalice sau nemetalice care la rândul lor pot fi obținute prin injecție metalică.	Pentru obținerea formelor intermediare, independente de materialul modelului de bază.

Procedeul		Observații
Sinterizare		De exemplu pentru realizarea electrozilor-sculă din pseudoaliaje.
Deformare Debavurare Deformări cu viteze ridicate Imprimare Forjare Matrițare Extrudare Laminare Tragere	Cu sau în cadrul sculelor pentru activitate productivă.	Și cu o calibrare ulterioară în vederea creșterii densității materialului și a îmbunătățirii formelor și dimensiunilor Electrozi sculă cu pereți subțiri sau cu rigiditate scăzută pot fi fixați pe corpuri purtătoare.
Debitare Erodare Așchiere		De exemplu atac chimic pentru modificări de formă și dimensiuni ale electrozilor-sculă.
Asamblare Lipire Cositorire Filetare Sudare	Din părți componente în vederea obținerii unui electrod-sculă complex.	

Prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact (E.E.R.C.) se bazează pe amorsarea descărcărilor în arc electric nestaționar, prin ruperea microcontactelor electrice parcurse de curent, stabilite spațial și temporar între obiectul de prelucrat și un obiect de transfer.

Procedeul poate fi încadrat în metoda de prelucrare dimensională prin eroziune (energii concentrate), cu particularitatea că agentul eroziv este constituit din impulsuri electrice amorsate succesiv pe cale mecanică, prin mișcări relative între obiectul de prelucrat și cel de transfer.

Mișcarea relativă între cele două obiecte în interacțiune, mișcare generatoare a impulsurilor electrice, poate fi continuă sau alternativă. În cazul mișcării continue, caracteristică debitării materialelor metalice, obiectul de transfer este constituit dintr-un disc sau bandă cu mișcare continuă de rotație sau translație în raport cu obiectul de prelucrat staționar (eventual mișcări axiale). În varianta mișcării alternative (vibratoare) caracteristică prelucrării spațiale, obiectul de transfer, de formă și dimensiuni corelate cu cele ale prelucrării necesare, execută o mișcare de apropiere-retragere în raport

cu obiectul de prelucrat, de asemenea staționar. La ambele variante cele două obiecte sunt conectate la un circuit electric de curent continu sau alternativ.

Cele două suprafețe ale obiectului de prelucrat respectiv ale obiectului de transfer se află în contact prin intermediul microneregularităților lor, unde se dezvoltă densități mari de energie, dezvoltându-se o cantitate de căldură pe baza efectului Joule-Lenz. Datorită mișcării relative între cele două obiecte microcontactele electrice sunt rupte, rezultând arcuri electrice de scurtă durată, cu efectele specifice agentului eroziv al eroziunii electrice. Ca și la prelucrare prin eroziune electrică cu impulsuri amorstate prin străpungere, agentul eroziv conține energie de natură electrică, mecanică și chimică, iar în zona de interacțiune această energie se transformă în energie de distrugere a integrității straturilor de suprafață ale obiectului supus prelucrării. Energia de distrugere este de natură termică, mecanică și chimică. Desfășurarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, pretinde introducerea unei anumite cantități de energie distructivă așa fel încât, să se depășească energia de legătură a particulelor din straturile superficiale ale obiectului supus prelucrării. Formarea aleatoare a microcontactelor electrice, respectiv ruperea lor, conduce la îndepărtarea de material pe întreaga suprafață a obiectului de prelucrat, supusă acțiunii obiectului de transfer. Mișcarea obiectului de transfer conduce la evacuarea microvolumelor de material prelevat din zona de prelucrare.

Prelucrarea prin eroziune cu rupere de contact, a cunoscut în timpul dezvoltării ei o multitudine de aplicații, care au condus la o relativă diversificare. Astăzi se pot distinge trei direcții de aplicare, dintre care unele au o răspândire relativ largă, iar altele sunt în curs de afirmare (fig 3.7).

Prelucrarea prin copiere este cea mai larg utilizată variantă de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. Mișcarea relativă între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer, necesară amorșării descărcărilor electrice de impuls, este asigurată majoritar prin vibrarea obiectului de transfer și mai rar prin rotirea acestuia în jurul propriei axe. Vibrațiile care le execută obiectul de transfer au, de obicei, o frecvență de 100 Hz (alimentare cu frecvența rețelei de energie electrică) și o amplitudine de ordinul zecimilor de milimetru până la 1...2mm. În aceste condiții la cursa de relaxare este asigurat contactul mecanic nemijlocit între obiectul de prelucrat și cel de transfer, contact care conduce la dezvoltarea unor scurcircuitate la nivel de microasperități cu degajare puternică de căldură prin efectul Joule-Lenz (intensități ale curentului electric relativ mari), iar la cursa de revenire contactele sunt întrerupte și se formează microarcuri electrice care, la rândul lor dezvoltă căldură.

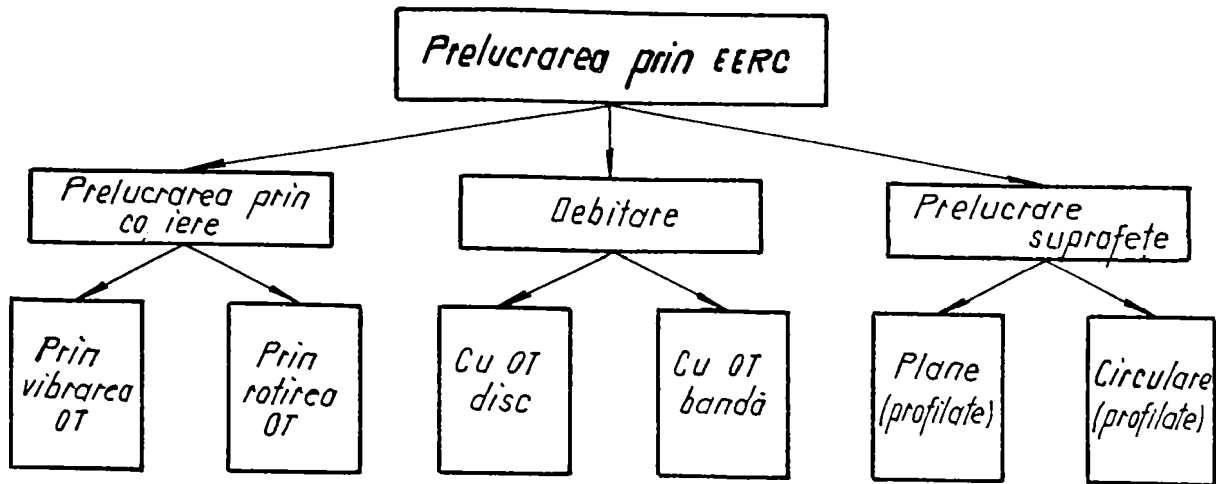


Fig.3.7. Variante cunoscute de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Efectul cumulat al acestor surse de căldură face ca local temperatura să crească suficient pentru topirea sau vaporizarea unor microvolumuri din materialul celor două obiecte în interacțiune.

La fel, ca la prelucrarea prin eroziune electrică cu descărcări amorțite prin străpungere, există și la eroziunea electrică cu rupere de contact cu copierea formei obiectului de transfer, un fenomen de selectivitate, determinat de apariția, repartizată statistic, a microcontactelor succesiv pe toată suprafața în interacțiune și astfel se va realiza acoperirea cu descărcări electrice a întregii suprafețe de prelucrat.

Literatura germană menționează exclusiv această variantă de prelucrare prin E.E.R.C., [11], [30] cum, de altfel, ea este singura variantă prezentată în normele VDI 3400, [134] și VDI 3402. [135].

Deoarece, această variantă de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact se desfășoară după un mecanism fizic elementar, care reprezintă doar parțial mecanismul fizic elementar al prelucrării prin E.E.R.C., ea nu va mai fi analizată în celelalte capitole și se vor face asupra ei, numai câteva referiri în cele ce urmează.

Specific modului de realizare și de rupere a microcontactelor electrice prin mișcări vibratorii ale obiectului de transfer este faptul că îndepărtarea de material la suprafața obiectului de prelucrat este asigurată numai de sursele termice (efect Joule-Lenz și arc electric nestăionar).

Fenomenele mecanice de abrazare, fenomene care la celelalte variante sunt prezente, lipsesc datorită specificului mișcării.

Acest lucru are o influență importantă, nefavorabilă asupra evacuării produselor eroziunii. Pentru compensarea acestui neajuns se impune o evacuare forțată intensă.

Ea este asigurată, de obicei, prin alimentarea prin injecție a spațiului de lucru cu fluidul necesar (apă, emulsii etc.).

În cazul prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact cu copierea formei electrozudului având mișcarea relativă de rotație se reîntâlnesc toate sursele active care contribuie la îndepărtarea de material, similare cu cele ale debitării sau prelucrării suprafețelor.

Una din operațiile pentru care sa cercetat această variantă este operația de trepanare pentru care sa realizat o instalație experimentală conform figurii 3.8. [87].

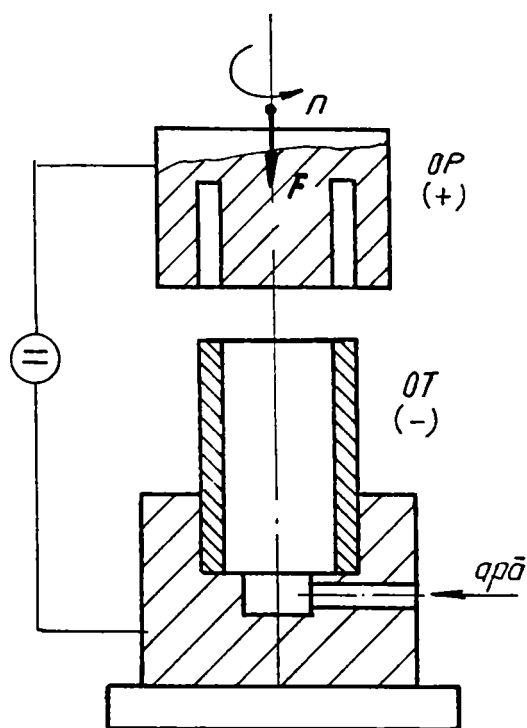


Fig.3.8. Schema copierii (trepanării) prin E.E.R.C.

Se remarcă amplasarea "inversă" a celor două obiecte, amplasare care este aleasă în această configurație spațială în vederea îmbunătățirii evacuării produselor eroziunii.

Acceptarea acestui avantaj presupune însă și acceptarea unor dezavantaje, dintre care principalul este prinderea dificilă a obiectului prelucrării cât și necesitatea asigurării mișcării relative dintre O.P. și O.T. prin mișcarea obiectului prelucrării care, de multe ori, este chiar imposibilă.

Evident că față de cele prezentate în, există și alte posibilități de amplasare spațială a celor două obiecte cu admiterea altor avantaje și dezavantaje.

La debitarea materialelor electroconductoare prin eroziune electrică cu rupere de contact cât și la prelucrarea suprafețelor prin acest procedeu mecanismul fizic al îndepărtării de material este un mecanism complex, format din mecanisme individuale-elementare care se condiționează și influențează reciproc.

Ca și la varianta de prelucrare prin E.E.R.C. cu mișcare vibratorie a obiectului de transfer sursele termice - efect Joule-Lenz și arcul electric nestăționar - sunt cauzele principale ale îndepărtării de material, dar la aceste variante trebuie evidențiată o pondere destul de importantă a fenomenului de

abrazare determinat de contactul mecanic nemijlocit și de viteza relativă între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer.

Diferențierea dintre aceste variante de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact este determinat de forma și dimensiunile obiectului de transfer.

Astfel în cadrul debitărilor se disting două variante determinate de forma obiectului de transfer.

Varianta debitării cu obiect de transfer sub forma unui disc metalic în mișcare de rotație (fig.3.9) este cea mai utilizată variantă de debitare până în prezent. [10], [26], [108].

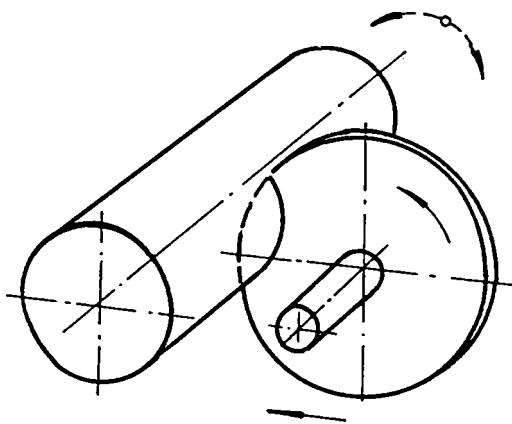


Fig.3.9. Principiul debitării prin E.E.R.C. cu obiect de transfer-disc.

Discul metalic execută o mișcare de rotație și de avans în așa fel încât, în timpul procesului de prelucrare și între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer va exista permanent o viteză relativă și o anumită presiune (cele două obiecte sunt conectate la o sursă de curent continuu sau alternativ). Avantajul principal al acestei variante constă în simplitatea constructivă a utilajului necesar, dar prezintă dezavantajul unei dependențe a condițiilor de desfășurare a procesului eroziv de rigiditatea mecanică a discului-electric, ceea ce conduce la necesitatea unor grosimi mărite ale acestuia

pentru debitarea unor dimensiuni mai mari ale obiectului de transfer, cu repercursiuni imediate asupra forțelor și intensității curentului electric necesar procesului (presiuni și densități de curent minim necesare), cât și a limitărilor dimensionale de aplicare a procedurii.

Varianta de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact cu obiect de transfer - banda mecanică este în curs de cercetare și încearcă să elimine neajunsurile primei variante prin utilizarea unei benzi cu mișcare liniară în raport cu obiectul de prelucrat și la care rigiditatea mecanică necesară este asigurată prin tensionarea corespunzătoare (fig.3.10). [16].

Datorită tensionării banda metalică poate avea grosimi minime cu efecte favorabile asupra reducerii forțelor de apăsare necesare și a reducerii intensității de curent cu care se alimentează spațiul de lucru. Dezavantajul variantei constă în complexitatea mărită a utilajului, dezavantaj care, dacă rezultatele practice preconizate - creșterea dimensională a semifabricatelor ce vor putea fi debitate - vor fi confirmate, este de acceptat.

Utilizarea procedurii de prelucrare prin E.E.R.C. la prelucrarea suprafețelor, presupune existența unor obiecte de transfer de forme și dimensiuni specifice.

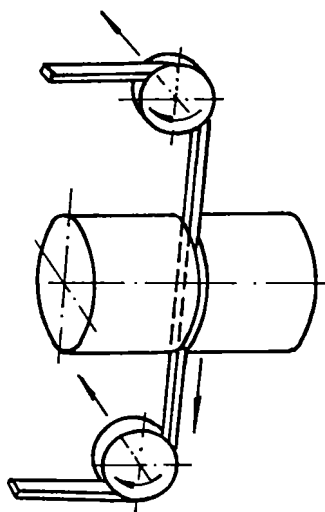


Fig.3.10. Principiul debitării prin E.E.R.C. cu obiect de transfer-bandă metalică.

În cazul prelucrării suprafețelor plane variantele pe care le menționează literatura de specialitate sunt grupate după poziția suprafeței la nivel de semifabricat și după natura geometrică a suprafeței de prelucrat.

Din punct de vedere al poziției suprafeței în raport cu semifabricatul, se disting prelucrări de suprafețe frontale și de suprafețe plane aflate într-o poziție oarecare la nivel de semifabricat.

La prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact a suprafețelor frontale (fig.3.11) obiectul de transfer, sub forma unui disc masiv are o mișcare de rotație într-un plan perpendicular cu axa semifabricatului. [77], [85], [108].

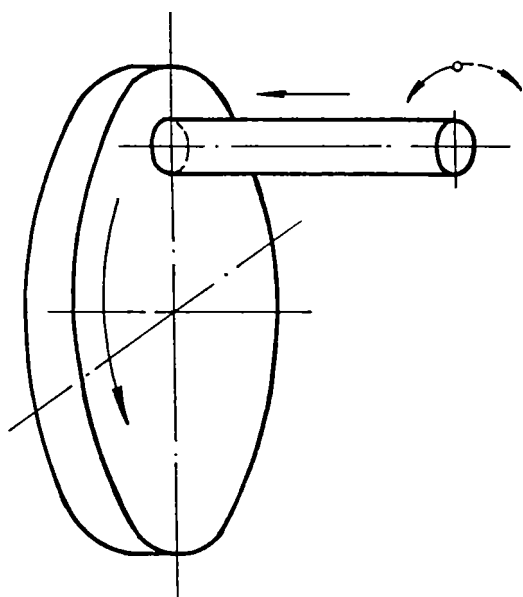


Fig.3.11. Principiul prelucrării prin E.E.R.C. a suprafețelor frontale plane.

Mișcarea de avans este o mișcare coaxială cu axa semifabricatului, deci o mișcare normală pe planul obiectului de transfer. Există și posibilitatea execuției de către obiectul de prelucrat a unor mișcări suplimentare de rotație, în sens trigonometric sau orar raportat la propria axă. [108].

Pentru alte poziții ale suprafețelor plane în raport cu semifabricatul, prelucrarea prin E.E.R.C. are loc cu o cinematică similară celei a rectificării plane (fig.3.12). [18], [111].

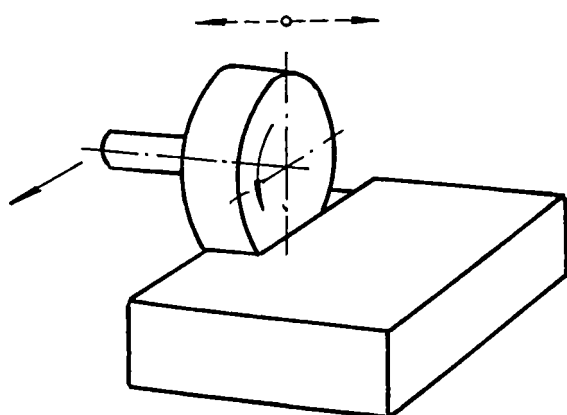


Fig.3.12. Principiul prelucrării prin E.E.R.C. a suprafețelor plane.

Obiectul de transfer sub forma unui disc cu o grosime mare execută patru mișcări relative în raport cu obiectul de prelucrat.

Mișcarea generatoare a prelucrării - mișcarea de rotație în jurul propriei axe - este mișcarea principală și poate fi executată, evident, numai de obiectul de transfer.

Mișcarea de pătrundere, care asigură grosimea

stratului îndepărtat, mișcarea de avans care asigură presiunea necesară desfășurării procesului eroziv și mișcarea de acoperire a întregii suprafețe necesar a fi prelucrată (mișcare transversală) poate fi realizată de obiectul de transfer sau de cel de prelucrat. Prelucrarea se efectuează cu suprafața generatoare a obiectului de transfer.

În cazul în care suprafața plană ce urmează a fi prelucrată trebuie să fie profilată, suprafața generatoare a obiectului de transfer va avea forma conjugată a profilului necesar (fig.3.13).

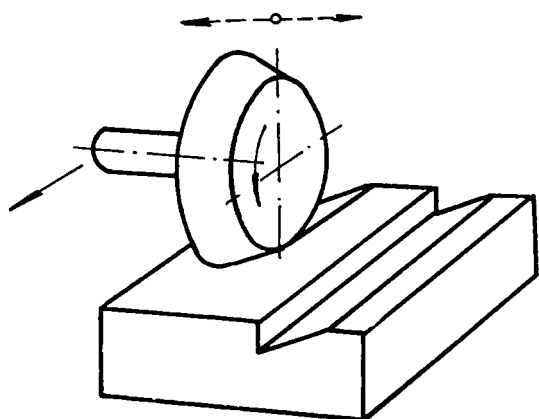


Fig.3.13. Principiul prelucrării prin E.E.R.C. a suprafețelor plane profilate.

La prelucrarea suprafețelor, atât cele plane cât și cele cilindrice, literatura de specialitate evidențiază și posibilitatea curățirii acestora prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Mișcările relative între cele două obiecte sunt similare cazului prelucrării suprafețelor plane.

În cazul prelucrării suprafețelor cilindrice lise sau profilate (fig.3.14), (fig.3.15) procedeul se aplică asemănător suprafețelor plane. [31], [57].

Mișcările de rotație ale obiectului de transfer cât și de cel de prelucrat, în așa fel încât să se realizeze generarea suprafețelor cilindrice iar viteza relativă între obiecte să fie cea impusă de desfășurarea

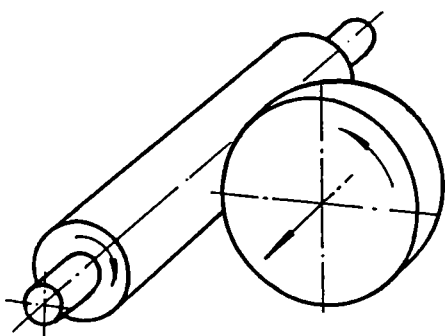


Fig.3.14 Principiul prelucrării prin E.E.R.C. a suprafețelor cilindrice.

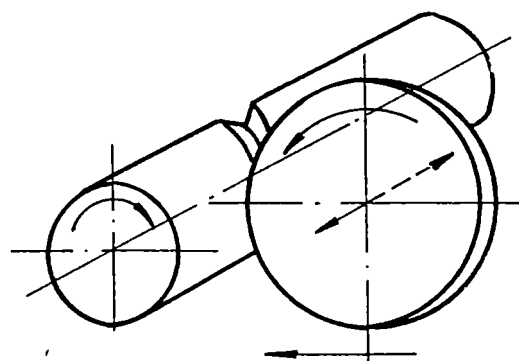


Fig.3.15. Principiul prelucrării prin E.E.R.C. a suprafețelor cilindrice profilate.

În acest scop obiectul de transfer este

format dintr-o perie metalică care execută o mișcare de rotație în jurul propriei axe (fig.3.16), care va determina desfășurarea procesului eroziv superficial și mișcări liniare pentru acoperirea întregii suprafețe. [90], [91].

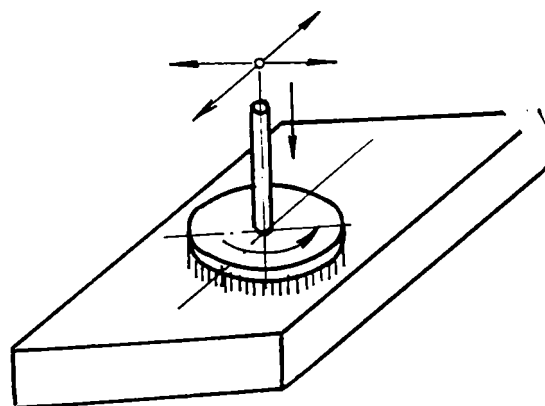


Fig.3.16. Principiul curățirii prin E.E.R.C.

În cazul curățirii prin E.E.R.C. a suprafețelor cilindrice atât obiectul de transfer sub formă de perie cilindrică, cât și cel de prelucrat execută mișcări de rotație. Și la această prelucrare sunt necesare mișcări liniare pentru acoperirea întregii suprafețe.

4. ALUMINIUL METAL AL SECOLULUI.

4.1. Istoric.

Aluminiul - metal de bază în industria sfârșitului de secol XX are o istorie relativ scurtă, el fiind obținut pentru prima dată în lume în anul 1827 la Berlin de către Friedrich Wöhler. [25], [103], [38], [42].

Cantitatea mică de aluminiu metalic, obținut pe cale chimică, prin reducerea clorurii de aluminiu cu potasiu îl făcea însă inutilizabil. Cel care pune bazele producției industriale de aluminiu este cercetătorul francez Henry Sainte-Claire Deville, care inițial (1852) reușește obținerea aluminiului în cantități mai mari (lingouri) pe cale chimică, iar ulterior (1854) pune bazele căii electrolitice. Ținând cont de importanța și eficacitatea căii electrolitice de obținere a aluminiului, cale utilizată industrial în exclusivitate, data de 20 martie 1854 poate fi considerată ca data de naștere a aluminiului. Rezultatele de electrolizare a clorurii duble de aluminiu și sodiu nu au fost satisfacatoare, motivul principal fiind lipsa surselor de energie electrică - pilele electrice, existente la vremea aceea erau insuficiente și foarte scumpe.

Acest neajuns a putut fi eliminat odată cu inventarea dinamului (Zenobe Gramme), care producea curent electric cu intensități mult mai mari și la un preț de cost substanțial mai mic.

Utilizarea acestei invenții la elaborarea aluminiului aparține lui Paul Heroult care brevetează în Franța, la 23 aprilie 1886 procedeul de preparare a aluminiului având la baza descompunerea, prin electroliză (dinam de 400A și 30V) a aluminei dizolvată într-o baie de criolită topită. Ulterior (15 aprilie 1887) acest brevet este îmbunătățit de Heroult prin renunțarea la încălzirea exterioară a creuzetului (în care se realiza electroliza), deoarece a ajuns la concluzia că, curentul electric dezvoltă suficientă căldură pentru a menține alumina în stare topită.

Aproape concomitent un tânăr absolvent al Universității din Oberlin - SUA, Charles Martin Hall parcurge un drum identic care conduce la înregistrarea brevetului la 9 iulie 1886.

Înregistrarea într-o perioadă aproape concomitentă a celor două brevete a condus la denumirea acestui procedeu de elaborare a aluminiului - procedeul Heroult - Hall.

Din acest moment producția de aluminiu este în continuă creștere, îmbunătățirile ulterioare ale procedurii fiind determinate, în special, de perfecționările surselor de alimentare cu energie electrică și implicit creșterea puterii lor.

Un moment important în "viața" aluminiului îl constituie începutul secolului XX când la Duren în Germania cercetătorul Alfred Wilm descoperă "îmbătrânirea aliajelor de aluminiu" punând astfel bazele producției de duraluminiu.

Aluminiul se utilizează, de regulă în aliere cu diferite alte metale, în rapoarte diferite, cum ar fi cuprul, siliciul, magneziul, zincul, manganul, plumbul, etc., rezultând un sortiment foarte larg de aliaje cu destinații deosebit de variate.

Evoluția producției de aluminiu în secolul XX este spectaculoasă. Dacă la începutul secolului existau doar opt uzine producătoare de aluminiu (cu producția între 900 și 3000 kg într-o zi), sfârșitul de secol inventariază peste 25 de țări producătoare cu peste 100 uzine care elaborează aliaje de aluminiu iar producția mondială depășește 20 milioane tone.

4.2. Principalele domenii de utilizare a aliajelor de aluminiu.

Caracteristicile proprii pe care le are aluminiul, [33], [142], [140], [101], [121], proprietăți care pot fi îmbunătățite într-un anumit scop prin aliere au condus la domenii de utilizare foarte largi și aproape în toate direcțiile de activitate umană. Cele mai importante caracteristici ale aluminiului, determinante pentru enorma sa aplicabilitate industrială sunt următoarele:

- este foarte ușor, o unitate de volum fiind mai ușoară de circa trei ori decât oțelul;
- prezintă caracteristici mecanice superioare, unele aliaje de aluminiu pot atinge o rezistență la rupere care o depășește pe cea a unor oțeluri uzuale;
- are o elasticitate ridicată, nefiind casant nici la temperaturi foarte joase (-250 C);
- este rezistent la coroziune deoarece se acoperă cu un strat subțire de oxid, aderent și impermeabil,
- conduce bine căldura, transmițând rapid și omogen căldura în toate direcțiile (ca atare nu prezintă puncte locale de supraîncălzire);
- este un bun conducător de electricitate, cu o conductivitate electrică care se situează la circa 60% din cea a cuprului;
- se prelucrează ușor;
- posedă o capacitate mare de reflexie, unele aliaje fiind capabile să reflecte peste 90% din razele incidente.

Pe lângă aceste proprietăți, care pot fi considerate esențiale, aluminiul mai posedă și alte caracteristici, destul de importante, cum ar fi: aspect decorativ, netoxic, nemagnetic, pasiv față de acidul azotic, oxidare exotermă, etc.

Datorită acestor proprietăți deosebite pe care le au aliajele de aluminiu domeniile de utilizare sunt extrem de diverse.

Una din principalele direcții în care s-a impus aluminiul este domeniul transporturilor. Prin ponderea ridicată de utilizare a lui în acest domeniu aluminiul este cunoscut și sub denumirea de "metal al transporturilor".

Practic, se poate afirma că toate mijloacele de transport moderne (terestre, navale, aeriene) au în componența lor foarte multe piese și subansamble din aliaje de aluminiu.

Motivele principale le constituie pe de o parte raportul deosebit de favorabil dintre caracteristicile mecanice (cu posibilități facile de îmbunătățiri substanțiale prin tratamente mecanice și termice) și greutatea specifică mică, iar pe de alta parte conductivitatea termică ridicată.

Aceste proprietăți fac ca aliajele de aluminiu să devină principalul material pentru confecționarea pistoanelor, chiuloaselor, carcaselor, etc. Evoluția cantităților de aluminiu utilizate la realizarea mijloacelor de transport (fig.4.1.) este elocventă pentru importanța lui în acest domeniu.

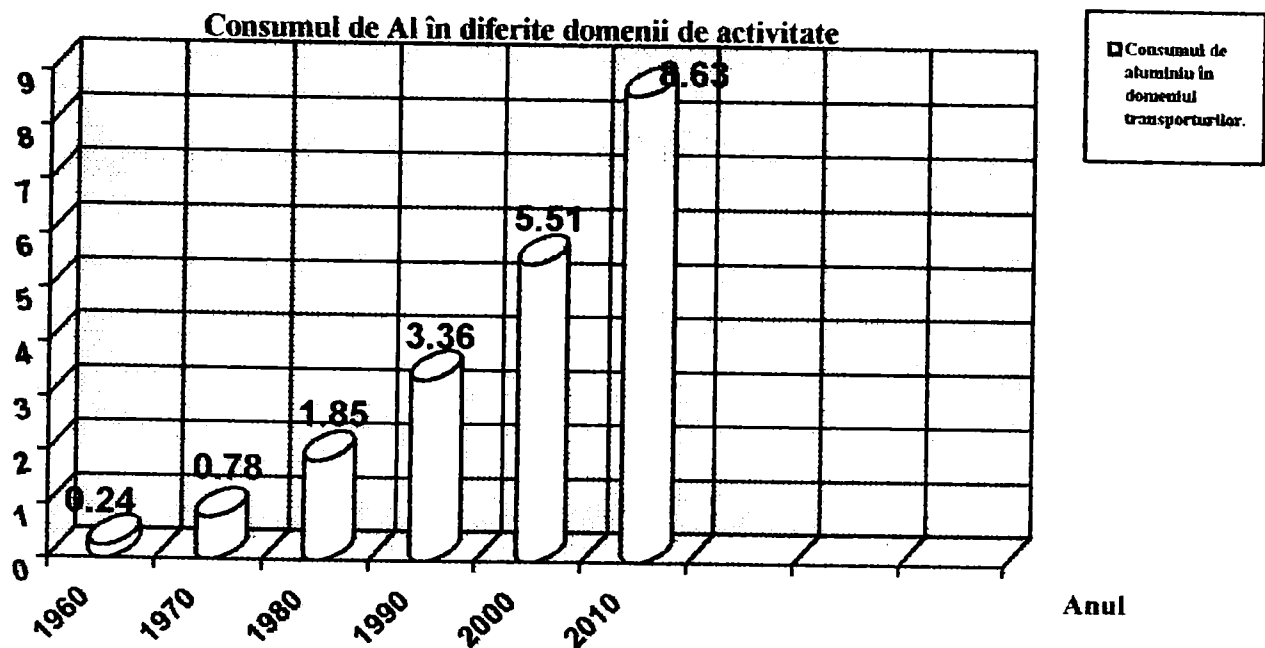


Fig. 4.1. Consumul de aluminiu în domeniul transporturilor.

Se constată creșteri spectaculoase de la un deceniu la altul și tendința este de creștere în continuare.

O evoluție asemănătoare o are consumul de aluminiu în industria constructoare de mașini (fig.4.2) unde tot mai multe piese sunt realizate din aluminiu, utilizându-se în acest mod deosebitele avantaje care le oferă acest metal. Sunt de menționat atât proprietățile enumerate anterior, dar și rezistența ridicată la coroziune în diferite medii (aer, apă, acizi, etc.), ceea ce determină utilizare largă în industria alimentară și în cea prelucrătoare a hidrocarburilor. Cumulul acestor proprietăți fac ca aliajele de aluminiu să se utilizeze frecvent la confecționarea tevelor, recipientilor, foliilor, schimbătoarelor de căldură, condensatoarelor și a multor aparate.

Bineînțeles ca și în alte domenii importanța aluminiului și a aliajelor sale este din ce în ce mai mare, fapt dovedit de consumul mereu mai crescut al lor (fig.4.3 , fig.4.4).

Practic se poate constata prezența aluminiului și a aliajelor lui în toate domeniile de activitate umană, ceea ce evaluează importanța sa. Importanța acestor materiale este subliniată și de faptul ca aluminiul este considerat al doilea metal, ca importanță industrială după fier.

Proprietățile lui specifice creează premisele pentru lărgirea ariei de utilizare și chiar extinderea ei la noi domenii . La toate acestea se adaugă și existența, încă în cantități suficiente a materiei prime din care se extrage.

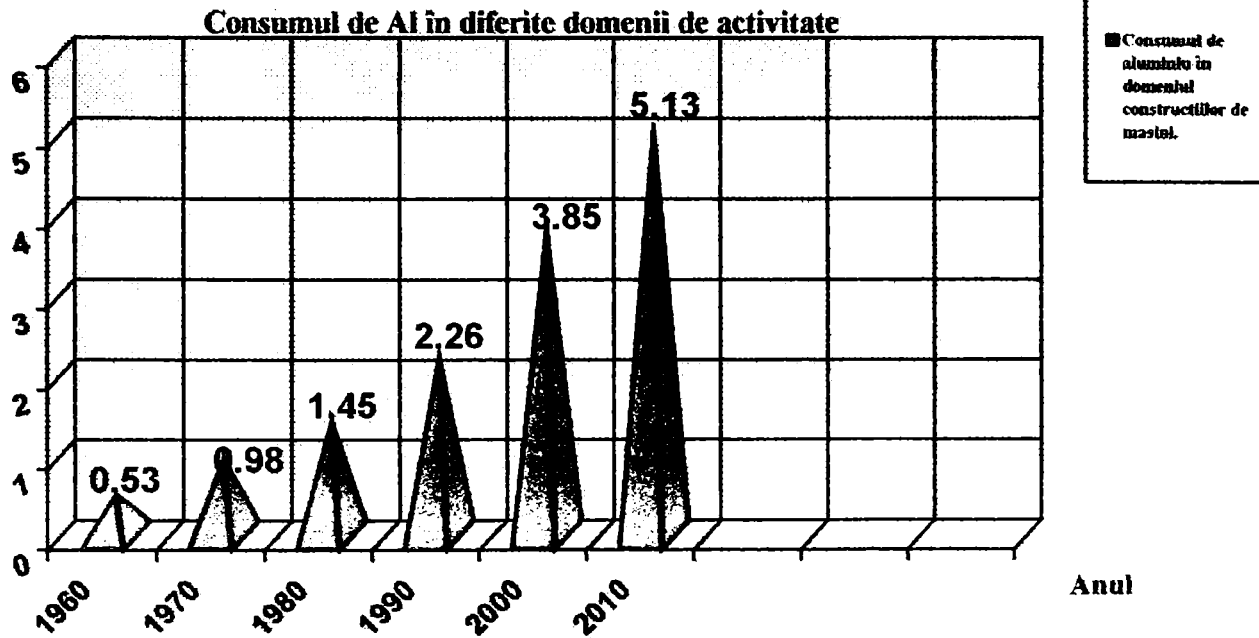


Fig.4.2. Consumul de aluminiu în industria constructoare de mașini.

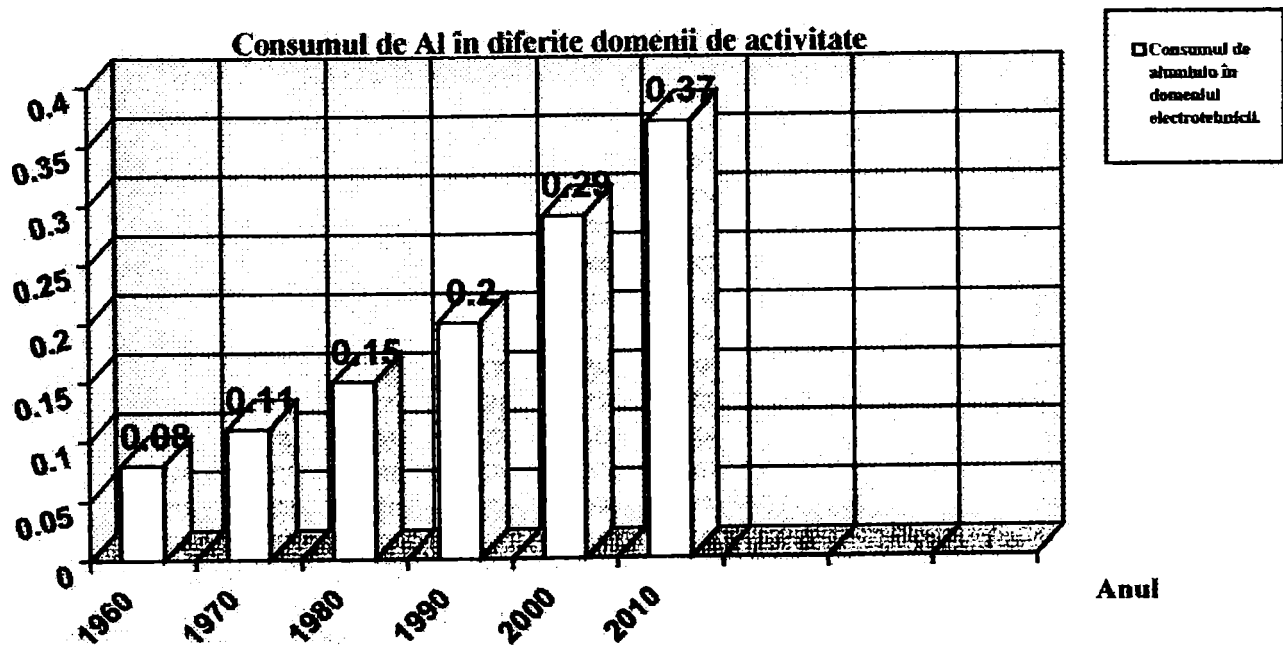


Fig.4.3. Consumul de aluminiu în industria electrotehnică.

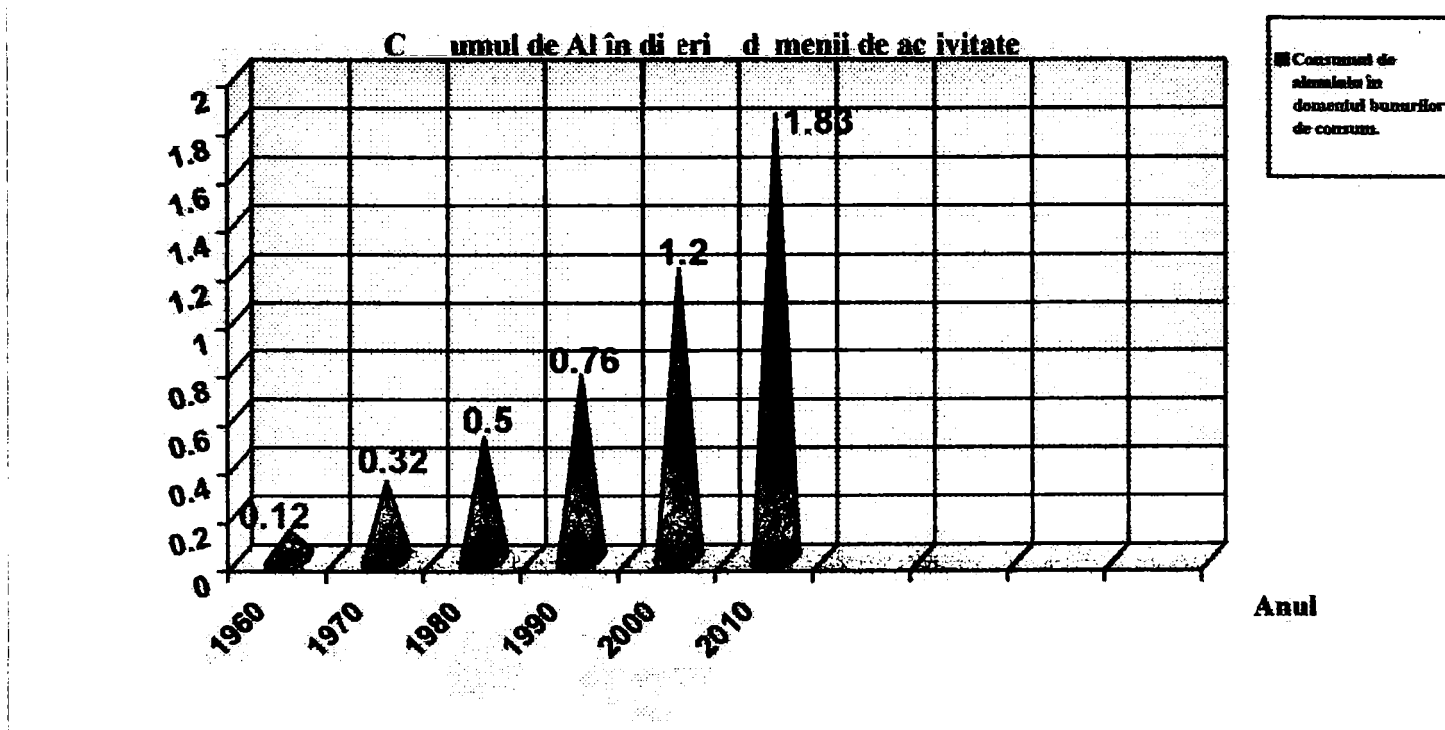


Fig.4.4. Consumul de aluminiu in industria bunurilor de consum.

4.3. Clasificarea aliajelor de aluminiu.

În general aluminiul prezintă proprietăți specifice, cu multiple utilizări industriale. Cu toate acestea, alierea lui poate îmbunătăți considerabil multe proprietăți, atât fizico-mecanice cât și tehnologice. Este evident însă că prin aliere aluminiul își diminuează anumite proprietăți cum ar fi ductilitatea, conductivitatea electrică, etc. Ca urmare, la alegerea unui aliaj trebuie admis un compromis între proprietățile care se exclud (de exemplu între proprietățile de rezistență și cele de plasticitate), astfel încât să se remarce în primul rând proprietatea care interesează pentru o aplicație concretă. Aliajele pe baza de aluminiu sunt fie aliaje binare, fie aliaje complexe, polinare, ultimile fiind cele mai des utilizate.

Numărul aliajelor de aluminiu elaborate și utilizate industrial este foarte mare și pot fi grupate, după destinația pe care o au în trei mari grupe: aliaje deformabile, pentru turnătorie și cu destinații (proprietăți) speciale (distincte). [33], [43], [103], [94].

Aliajele deformabile cuprind acele aliaje de aluminiu destinate a fi prelucrate prin deformare plastică la cald sau la rece. Ele se împart în aliaje deformabile nedurificabile și aliaje deformabile durificabile prin tratament termic (fig. 4.5).

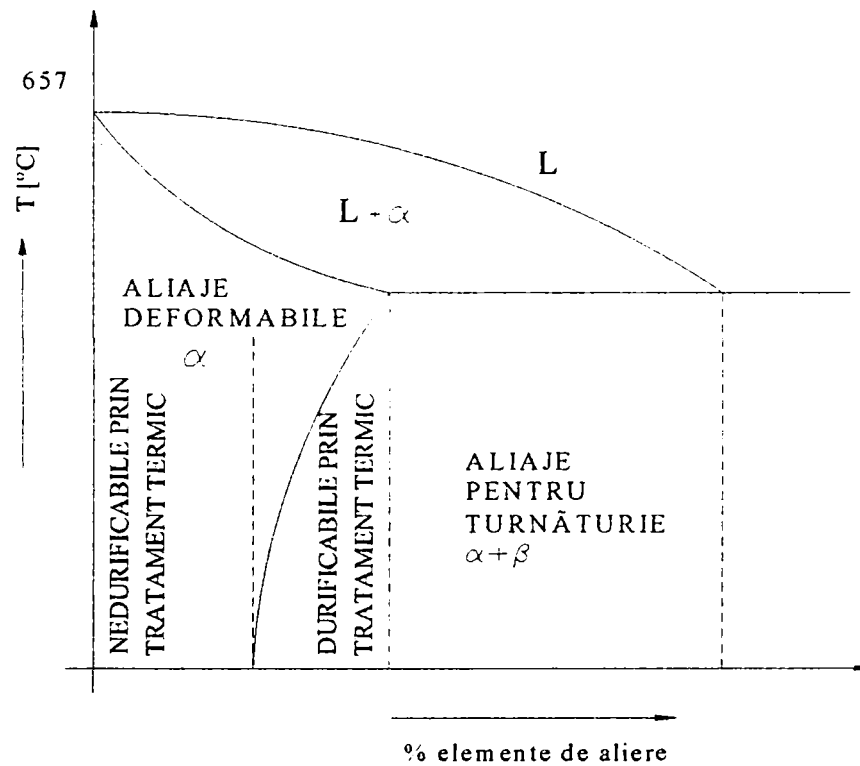


Fig.4.5. Diagrama de echilibru cu clasificarea aliajelor de aluminiu.

Din grupa aliajelor nedurificabile prin tratament fac parte aliajele de tip Al-Mn, Al-Mg și Al-Mn-Mg. Aceste aliaje se deformează plastic foarte ușor. Datorită facilităților față de lustruirea chimică sau electrochimică ele se utilizează la fabricarea ornamentelor, a reflectoarelor, a diferitelor obiecte de uz casnic, dar și în domeniul construcției de aparate sau construcții navale (aliaje rezistente la acțiunea apei de mare). [140].

Aliajele deformabile, durificabile prin tratament termic (Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Cu-Ni-Mg) sunt aliajele care admit tratamente termice de durificare prin precipitare (călire și îmbătrânire). După călire (încălzire la ~ 500 C și răcire rapidă), aliajele se supun operației de îmbătrânire, care poate fi naturală (menținere 4...5 zile la temperatura de 20 C) sau artificială (încălzire la 175...200 C continuat cu o răcire lent).

Reprezentantul cel mai important al acestei grupe este aliajul Al-Cu-Mg cunoscut în practica sub denumirea de duraluminiu. Acesta are proprietăți mecanice asemănătoare oțelurilor moi (în stare călită și îmbătrânită $R_m \sim 50$ daN/mm, $R_c \sim 30$ daN/mm, $A \sim 15\%$ și $HB \sim 70 \dots 100$), ceea ce conduce la utilizarea lui frecvența în domeniul construcțiilor de mașini pentru construcții mecanice și metalice ușoare și în aeronautică. De menționat că duraluminiul poate fi deformat plastic ușor imediat după călire când se găsește în stare plastică, iar îmbătrânirea se poate produce în continuare spontan.

Aliajele pentru turnatorie trebuie să aibe fluiditate ridicată, contracție relativ mică, susceptibilitate scăzută la fisurările la cald și de formare a porozităților, etc., adică proprietăți specifice turnării în forme temporare sau permanente.

Dintre toate aliajele pentru turnatorie (Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn, Al-Si, Al-Mg-Cu-Ni-Cr, Al-Si-Mg-Cu-Ni-Mn, etc.) cele mai utilizate sunt aliajele Al-Si - siluminurile. La 12% Si aceste aliaje prezintă cele mai bune proprietăți de turnare dintre toate aliajele pe baza de aluminiu. Fluiditatea ridicată a acestor aliaje asigură o umplere completă a formei de turnare, chiar și în cazul formelor pentru piese cu pereți subțiri. Contractia redusă după solidificare permite realizarea pieselor turnate cu toleranțe foarte mici. Aceste aliaje sunt tratabile termic (călire cât și îmbătrânire artificială), îmbunătățindu-li-se astfel proprietățile, chiar dacă într-o măsură mult mai mică decât la cele deformabile. Prin adaosul de cupru (până la 3%) se îmbunătățesc proprietățile de turnare, proprietățile mecanice (R_m, R_c , duritatea) și așchiabilitatea, iar adaosul de Mg (0,3...0,6) asigură durificarea prin precipitare (îmbătrânirea) și astfel crește rezistența.

Aliajele din sistemul Al-Mg (5...12% Mg) sunt cele mai ușoare aliaje de aluminiu, prezintă o rezistență mecanică destul de ridicată, concomitent cu o rezistență la coroziune și o așchiabilitate deosebit de bună.

Aliaje de aluminiu cu proprietăți speciale sunt aliajele, care prin aliere cu diferite elemente capătă proprietăți specifice unui anumit domeniu de utilizare. În această grupă de aliaje de aluminiu pot fi remarcate aliajele pentru pistoane (Al-Cu, Al-Cu-Si-Mg, Al-Cu-Ni-Mg), care se obțin fie prin turnare, fie prin forjare, aliaje pentru conductori electrici (Al-Mg-Si), aliaje pentru aeronautica, aliaje antifricțiune etc.

Aliajele de aluminiu din toate cele trei grupe de clasificare au o prelucrativitate prin așchiere mai bună decât oțelurile, permitând viteze de așchiere substanțial mai mari; așchiabilitatea este cu atât mai bună cu cât rezistența aliajelor este mai ridicată, fie prin aliere, fie durificare prin precipitare, fie prin ecruisare.

4.4. Aspecte privind prelucrabilitatea aliajelor de aluminiu.

Se știe că, în general materialele au afinități față de anumite proprietăți tehnologice, funcție de proprietățile lor mecanice și fizice, în general sau numai de anumite proprietăți. [56]. Astfel, materialele cu tenacitate mică și duritate ridicată (fontă, aliajele dure sinterizate, etc.) nu se pot prelucra prin deformare plastică (eventual numai în condiții speciale și cu parametri tehnologici scazuti).

Aliajele de aluminiu, ca de altfel și oțelurile au deosebitul avantaj de a prezenta proprietățile tehnologice în ansamblul lor deosebit de bune.

În cele ce urmează se vor sintetiza cele mai semnificative aspecte ale prelucrărilor aliajelor de aluminiu, analizele oprindu-se la acele procedee care prezintă posibilități de a fi aplicate la debitare.

4.4.1. Prelucrabilitatea prin așchiere.

Prelucrabilitatea prin așchiere a aliajelor de aluminiu este o consecință a proprietăților fizice și mecanice ale lor. Astfel coeficientul de dilatare al acestor aliaje, cuprins între $18 \cdot 10^{-6}$ și $23,8 \cdot 10^{-6}$ grd.C. pretinde măsuri deosebite pentru preluarea alungirilor ținând seama de variațiile cotelor datorită încălzirii. Totodată se impune și o evacuare eficientă și rapidă a căldurii prin folosirea adecvată a lichidelor de lucru. [28], [46], [105].

Prezența siliciului în majoritatea aliajelor de aluminiu este cauza principală a uzurii accentuate a sculelor așchietoare. Ea trebuie acceptată atât pentru influența ei asupra vitezei de așchiere cât și asupra preciziei de prelucrare (datorită uzurii mai accentuate a sculelor). Și celelalte elemente de aliere obișnuite pentru aliajele de aluminiu contribuie la asigurarea unor aschiabilități bune a acestor aliaje. Este cazul cuprului, plumbului, manganului bismutului, magneziului, etc., care prin modificări ale formelor așchiilor pot conduce la o aschiabilitate mai bună.

În general, se poate afirma ca aschiabilitatea aliajelor de aluminiu este strict dependentă de duritatea lor, duritate obținută fie prin aliere, fie prin tratamente termo - mecanice. La durități mici

așchiera este îngreunată datorită formării accentuate a depunerilor pe tăiș, în schimb la duritățile mari prelucrarea prin așchiere se produce ușor, dar uzura sculelor crește.

Cea mai acută problemă la prelucrarea prin așchiere a aliajelor de aluminiu o constituie depunerile pe tăișul sculelor așchietoare. Aceste depuneri apar frecvent pe fața de degajare a sculei și mai rar pe fața ei de așezare, imediat lângă muchia tăișului. Apariția și dezvoltarea lor sunt favorizate de anumite condiții de desfășurare a așchierii (viteza de așchiere, temperatura, lichid de așchiere, etc.) și de unele proprietăți ale materialului piesei, respectiv ale sculei.

Mecanismul apariției depunerilor pe tăișul sculei este destul de complex și se datorează, în esență deformării plastice secundare a straturilor inferioare ale așchiei în contact cu scula. Frecarea care are loc între scula și straturile inferioare ale așchiei frânează deplasarea acesteia, formându-se o textura longitudinală în aceste straturi și o zonă de metal frânat pe sculă. Metalul frânat se lipește de tăiș, pe fața de degajare și uneori și pe fața de așezare. Continuarea așchierii conduce, normal la menținerea forțelor de așchiere, care dezvoltă presiuni ridicate. Prin acțiunea acestor presiuni, metalul lipit se durifică, ajungând la valori ale durității mai mari decât cele ale metalului de bază.

Frecarea în continuare a straturilor inferioare ale așchiei cu depunerile pe tăiș determină continuarea mecanismului de depunere și stratul depus pe tăiș crește cantitativ. În acest fel geometria muchiei suferă modificări, prin creșterea razei tăișului, cu consecințe directe asupra capacității de așchiere.

La prelucrarea aliajelor cu duritate mare creșterea cantității de metal depus este însoțită de o netezire a suprafețelor exterioare ale acestor depuneri și astfel coeficientul de frecare dintre metalul depus pe tăiș și așchie scade. În cele din urmă se poate ajunge la desprinderea depunerilor, cauzată de forțele de așchiere relativ mari. La rândul lor, aceste desprinderi periodice de metal cu duritate mărită influențează negativ rugozitatea suprafeței prelucrate prin acțiunea vârfurilor formate prin sfărâmare.

La aliajele mai moi depunerile pe tăiș cresc cantitativ ceea ce face ca straturile de metal frânat să crească. ca urmare cresc forțele de așchiere, care produc rupeuri din depunerile pe tăiș care sunt presate pe suprafața prelucrată sau sunt antrenate de către așchii. Totuși, forțele de așchiere nu sunt suficiente pentru înlăturarea completă a depunerilor pe tăiș, o parte continuând să rămâne pe scula, în special primele straturi de metal frânat, care sunt foarte bine lipite pe sculă datorită forțelor de adeziune mari și a forțelor de așchiere care le-au presat.

În acest fel geometria sculei suferă modificări și procesul de așchiere este înrăutățit prin variația suprafețelor de contact dintre sculă și piesă, respectiv dintre sculă și așchie. Modificarea parametrilor procesului de așchiere va avea implicații directe asupra caracteristicilor tehnologice.

Efectele negative ale depunerilor pe tăiș pot fi evitate prin alegerea unor parametri de așchiere corespunzători și în concordanță cu aliajele de aluminiu supuse prelucrării, respectiv prin anumite particularizări specifice.

În acest sens s-a constatat că viteza de așchiere poate reduce, în anumite cazuri cantitatea de metal depus pe tăiș deoarece variația ei conduce la variația coeficientului de frecare și a coeficientului de compresiune plastică, ceea ce conduce la variația forței de așchiere.

Avansul și adâncimea de așchiere pot, la rândul lor să reducă depunerile pe tăiș și în general să influențeze procesul de așchiere prin faptul că determina dimensiunea așchiei. Cu cât dimensiunile așchiei sunt mai mari cu atât evacuarea lor este mai dificilă existând tendința de aglomerare pe fața de degajare a sculei, care la rândul ei conduce la creșterea presiunii pe depunerile anterioare și astfel este posibilă creșterea cantității de metal depus pe tăiș. Aceasta situație este cu atât mai accentuată cu cât materialul care se prelucurează are proprietăți de plasticitate mai bune.

Utilizarea unor lichide de așchiere adecvate pentru așchierarea aliajelor de aluminiu face ca așchiabilitatea lor să crească, uneori cu valori semnificative. Principial îmbunătățirea așchiabilității se explică prin diminuarea formării depunerilor pe tăiș și implicit a aderențelor pe suprafața piesei prelucrate dar și printr-o evacuare mai bună a așchiilor, în special a celor mărunțite.

Materialul și geometria sculelor așchietoare are de asemenea o influență mare asupra depunerilor pe tăișul sculelor așchitoare. S-a constatat că depunerile pe tăișul sculelor așchietoare din oțel rapid sunt mai mari decât depunerile pe tăișul sculelor așchietoare din materiale dure sinterizate. Motivul acestor diferențieri constă în aderența mai bună a aliajelor de aluminiu față de oțelul rapid în comparație cu plăcuțele dure. Aderența mai bună conduce la formarea pe sculele din oțel rapid a unor depuneri în cantități mai mari și cu stabilitate mai bună.

În esență se poate afirma că aliajele de aluminiu prezintă proprietăți de așchiabilitate foarte bune, dar procesul de prelucrare este înrăutățit, în unele cazuri chiar substanțial de maleabilitatea ridicată și de temperatura de plastifiere joasă care caracterizează aceste aliaje.

Una dintre operațiile de așchiere cu dificultăți majore este debitarea, care aplicată la aliajele de aluminiu accentuează aspectele negative ale așchiabilității acestor materiale

4.4.2. Prelucrabilitatea prin abrazare.

În acest grup de procedee de prelucrare pot fi încadrate prelucrările efectuate cu scule cu tășuri multiple și cu orientări oarecare. Cu toate că, în esență și aceste prelucrări se desfășoară prin acțiunea tășurilor asupra materialelor, deci pot fi analizate sau încadrate în grupul procedeeelor de prelucrare prin așchiere, particularități specifice determină și structurarea lor într-un grup distinct.

Prin faptul că îndepărtarea de material are loc datorită unui număr foarte mare de “miniscule” care acționează simultan asupra piesei particularitățile așchiabilității aliajelor de aluminiu se vor reântâlni și la acest grup de procedee de prelucrare.

Pe lângă specificul acțiunii aleatoare a numărului mare de tășuri, la prelucrările prin abrazare apare și posibilitatea desprinderii granulelor din scula cât și accentuarea fenomenelor de depunere pe tășuri, ceea ce în aceste cazuri conduce la “îmbâcsirea” cu așchii de aluminiu a sculei. Pe de altă parte, frecările dintre abraziv, așchii și piesă conduc la dezvoltarea unor cantități de căldură, uneori cu valori destul de ridicate, care pot dezvolta temperaturi suficient de mari pentru apariția modificărilor de structură. O problemă tehnologică acută este uzura mare a abrazivilor, atât cea referitoare la lațime cât, în special cea referitoare la diametru, care devine cu atât mai evidentă cu cât lațimea sculei scade. Reducerea diametrelor sculelor conduce la modificarea vitezelor periferice, iar procesul de abraziune se înrăutățește.

În cazul debitărilor, au devenit uzuale variantele de debitare cu disc abraziv și prin fricțiune. La utilizarea, pentru debitarea unor discuri abrazive sau discuri metalice cu diametre de zeci până la sute de milimetri este redusă substanțial suprafața lor în contact cu materialul piesei, datorită necesității, evidente de a reduce lățimea tăieturilor la un minim acceptabil. Această reducere a suprafețelor active conduce la accentuarea tuturor aspectelor determinate de mecanismele elementare de îndepărtare a surplusului de material, fiind evident, în special fenomenul de depunere pe tăș prin cumulul acestui fenomen, care se desfășoară pe toate muchiile așchitoare ale discului, suprafața lui activă se “îmbâcsește” în scurt timp, pierzându-și astfel capacitatea de așchiere.

4.4.3. Forfecarea.

Forfecarea este un procedeu de prelucrare cu aplicabilitate aproape exclusivă în domeniul debitărilor. El este un procedeu de mare productivitate, fără pierderi de material, sub forma de deșeuri, în zona de tăiere [39], dar are dezavantajul de a putea fi aplicat numai la debitarea materialelor aflate sub forma de bare.

În mod obișnuit forfecarea se realizează cu foarfece sau ștanțe pe prese. Procesul tehnologic de tăiere pretinde existența unui joc între cuțite. În consecință, suprafața frontală a pieselor este înclinată datorită încovoierii capătului liber, în consola al barei. Se demonstrează [38], că jocul dintre cuțite este dependent de duritatea materialului supus operației, astfel la debitarea prin forfecare a barelor din materiale cu duritate mare jocul va avea valori mai mari decât în cazul debitării barelor din material mai moale.

Existența jocurilor conduce la apariția unor defecte sistematice ale suprafețelor debitate cum ar fi bavurile sau deformațiile locale, care sunt cu atât mai mari cu cât materialul este mai moale. Apariția acestor defecte este accentuată în cazul debitărilor prin forfecare la cald. Această variantă de debitare se aplică, în special materialelor cu duritate mare la care debitarea la rece conduce la apariția fisurilor. Precizia pieselor obținute prin această variantă de debitare este și mai scăzută decât în cazul debitării la rece și coreland acest dezavantaj cu cel determinat de macro- și micromodificările structurale rezultate ca urmare a încălzirii face ca această variantă să aibe utilizare limitată.

Varianta debitării prin forfecare de precizie este specifică producției de serie mare și masa și se deosebește de variantele anterioare, în special prin faptul că semifabricatul supus debitării este prins în dispozitive specifice. În funcție de forma constructivă a dispozitivelor de debitare procesul tehnologic poate să se desfășoare de la forfecarea deschisă, fără strângerea materialului până la forfecarea închisă cu strângerea elastică sau rigidă a materialului. Evident că precizia debitării crește de la prima variantă până la ultima, trecând și prin cele intermediare (semideschisă, semi-închisă).

Cu toate că procedeu de debitare prin forfecare la rece, de precizie prezintă marele avantaj de a oferi piese aflate într-un domeniu dimensional foarte restâns, prezintă și un dezavantaj, poate în

același ordin de mărime, și anume necesitatea utilizării unor utilaje de complexitate destul de ridicată și, în consecință cu un cost destul de ridicat.

4.4.4. Prelucrabilitatea cu energie termică.

Ținând cont că în cazul aluminiului și ale aliajelor sale temperatura de aprindere în oxigen este mult mai mare decât temperatura de topire, rezultă că prelucrarea cu energie termică se bazează numai pe topirea materialului. Această condiție pretinde la rândul ei, surse termice intense, capabile să asigure parametri corespunzători caracteristicilor termo - fizice proprii aluminiului și aliajelor sale.

Pe lângă această principală limitare a prelucrării cu energie termică a aluminiului și aliajelor lui sunt de remarcat și alte dificultăți [68], [128]:

- conductivitatea termică ridicată a acestor materiale determină o pierdere substanțială de căldură ceea ce determină o reducere a intensității termice a sursei,
- contactul aluminiului cu oxigenul din atmosferă conduce la formarea instantanee a unei pelicule de oxid (Al_2O_3) caracterizată prin rezistențe termice, chimice, și electrice ridicate (temperatura de topire a aluminiului - 931 K, temperatura de topire a peliculei - 2523 K),
- aluminiul prezintă capacitatea de a dizolva ușor gaze când se află în stare lichidă și relativ redusă în stare solidă ceea ce provoacă frecvent porozități în zona prelucrată.

Această comportare deosebită a aluminiului și a aliajelor sale față de sursele termice face inefficiente, pentru aplicații industriale sursele uzuale (arc electric, flacăra oxi-gaz).

Sursa termică care poate asigura eficiență, siguranță și economicitate la prelucrarea aluminiului este plasma. Cu ea devine normală sudarea, tăierea și chiar prelucrări asimilate celor prin așchiere (strunjire, găurire, frezare)

4.4.5. Prelucrabilitatea prin tehnologii neconvenționale.

După cum s-a arătat în capitolul 3 prelucrarea prin tehnologii neconvenționale (prin eroziune, cu energii concentrate) se bazează în esență pe distrugerii localizate spațial și temporal ale

unor surse termice rezultate prin acțiunea unui agent eroziv sau prin acțiuni chimice (electrochimice) ale agentului eroziv.

Cum proprietățile aluminiului și ale aliajelor lui sunt performante tocmai în ceea ce privește rezistența termică și chimică ridicată, rezultă o prelucrabilitate destul de dificilă prin tehnologiile de prelucrare erozive.

4.5. Debitarea aliajelor de aluminiu.

Debitarea materialelor trebuie acceptată ca un caz particular al prelucrării lor. Particularizarea constă fie în cinematica specifică ale sculelor, la rândul lor cu forme particulare sau a pieselor, fie prin particularizarea mediului energetic care condiționează operația. Există și situații când cele două categorii de particularități coexistă.

Din aceste motive la debitarea aluminiului și a aliajelor sale se vor regăsi toate restricțiile generale ale prelucrărilor, prezentate anterior, cu observația că funcție de procedeul de prelucrare una sau alta dintre restricții poate fi accentuată (mai rar diminuată).

Piesele debitate prin orice procedeu pot fi relizate fără deformații majore, iar abaterile geometrice și dimensionale se încadrează, de regula în limitele toleranțelor admisibile. De asemenea, straturile superficiale nu suferă transformări esențiale, ceea ce va permite prelucrarea ulterioară a acestora prin orice procedeu de prelucrare mecanică. Practic, pentru debitari se pot utiliza toate procedeele de prelucrare, dar în mod uzual se aplică procedeele prezentate în figura 4.6. Aplicarea unuia sau altuia dintre procedeele tehnologice indicate în figura 4.6 depinde în primul rând de factorii tehnologici cum ar fi: precizia impusă pieselor și locul operației de debitare în procesul tehnologic, iar în al doilea rând de factori manageriali cum ar fi: utilajul existent și disponibil, volumul producției, ritmul de fabricație, consumul de material, s.a.

La toate acestea se adaugă limitele de aplicare a procedeelelor, privite atât prin prisma condițiilor tehnologice de aplicare, cât și prin prisma economică de rentabilitate a aplicării.

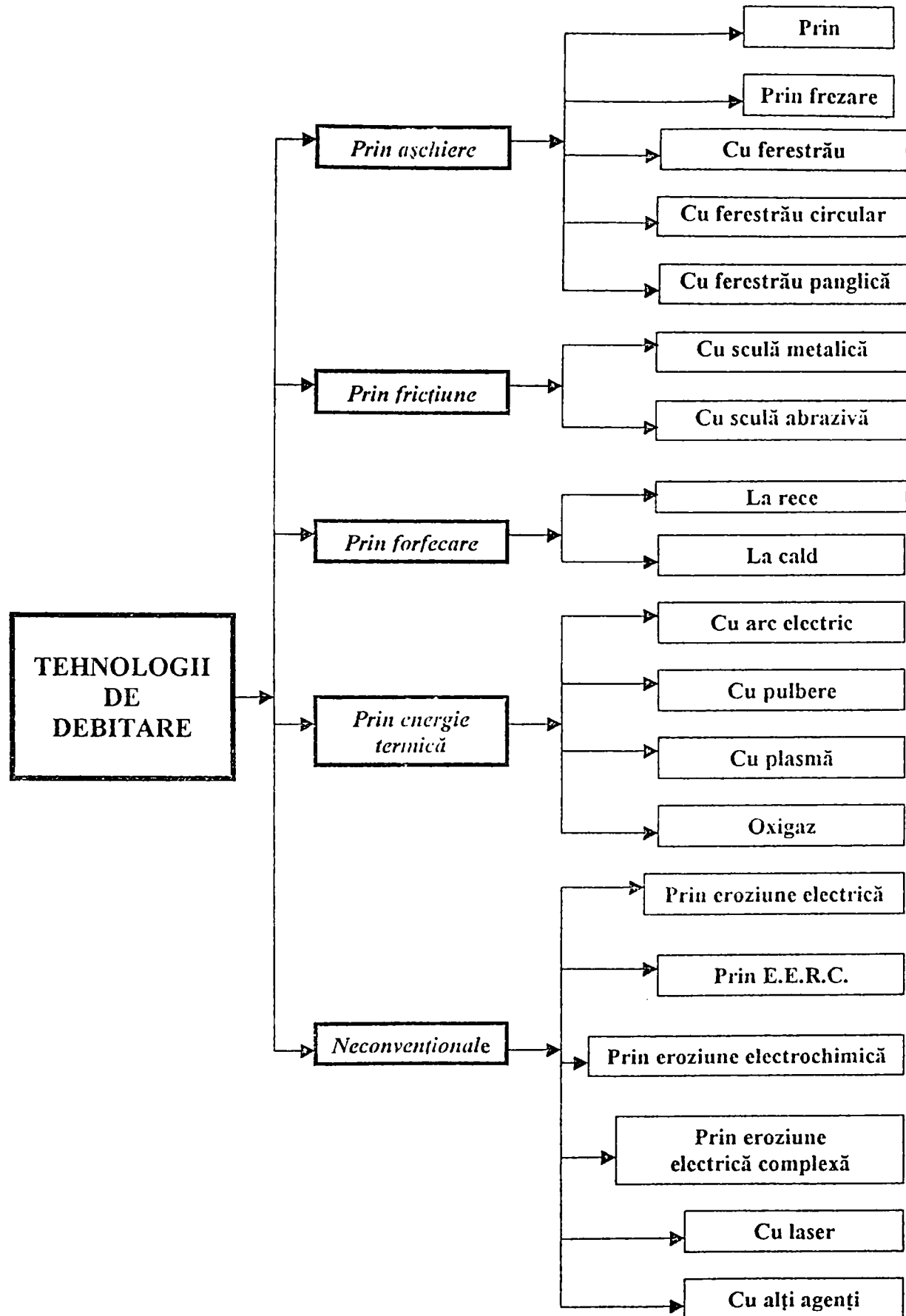


Fig. 4.6. Metode și procedee de debitare pentru aliajele de aluminiu.

4.6. Analiza tehnico-economică a debitării aluminiului și a aliajelor lui.

Analiza tehnică și economică a unor procedee de debitare (fig. 4.7) [35], scoate în evidență existența unor domenii stricte pentru utilizarea unui procedeu sau altul de debitare, aproape indiferent de materialul supus debitării. Se constată de asemenea că pentru anumite materiale și domenii dimensionale se recomandă mai multe procedee, fără a se preciza condițiile de alegere a procedeeului corespunzător.

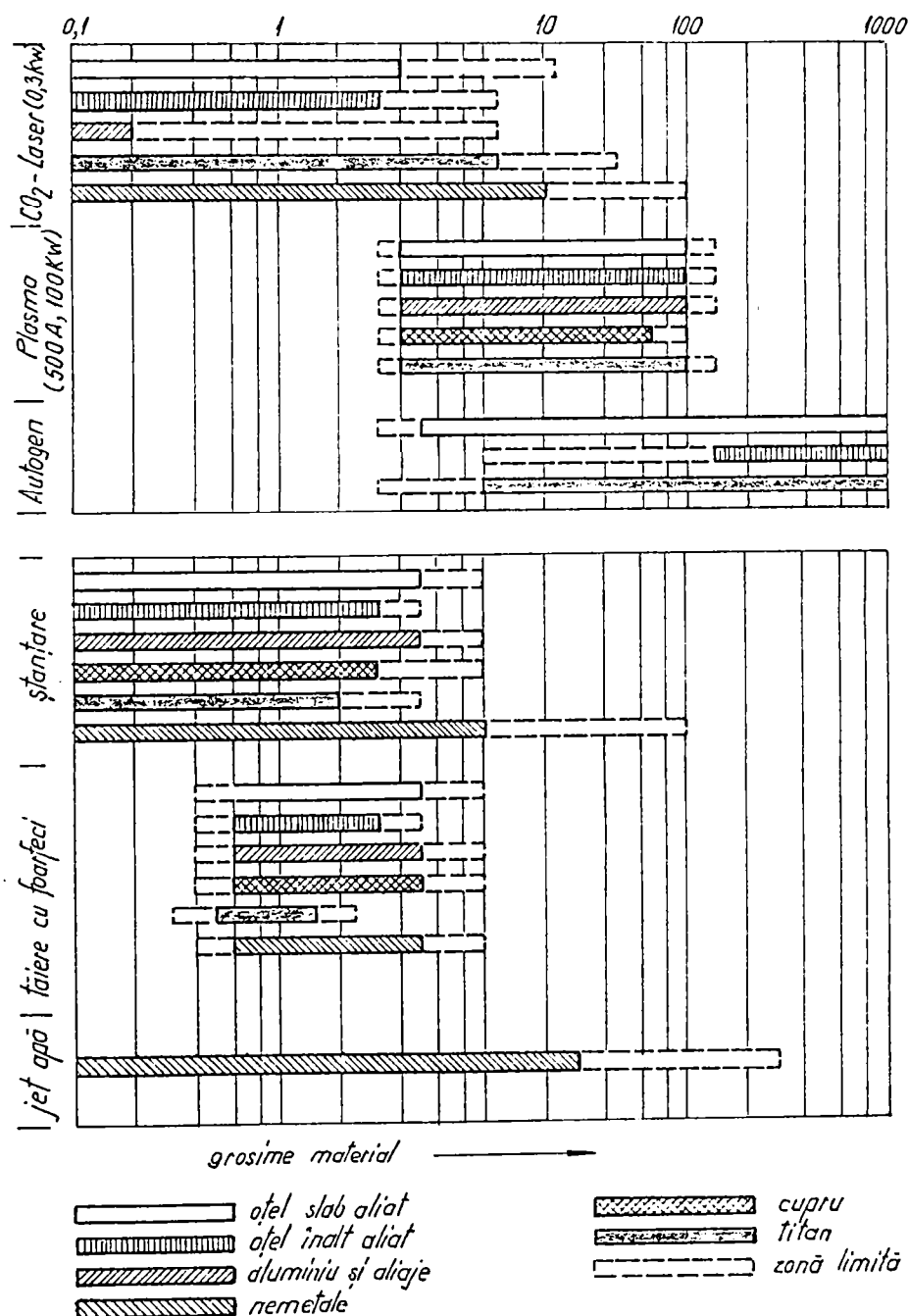


Fig. 4.7. O analiză tehnico-economică comparativă a unor procedee de debitare.

În vederea obținerii unor precizări pentru alegerea corectă și obiectivă a procedurii de debitare cu cele mai bune efecte tehnice și economice se impune o analiză amplă care să țină cont de toate aspectele care concură la obținerea optimului. O astfel de analiză are la baza identificarea criteriilor de evaluare a procedurilor de debitare, urmată de stabilirea ponderii fiecărui criteriu [68].

În cazul aplicării acestei metode pentru analiza comparativă a procedurilor de debitare utilizabile la debitarea aluminiului și a aliajelor lui pot fi identificate 11 criterii de evaluare grupate conform a 3 direcții principale (tabelul 4.1.) - criterii tehnice, economice și criterii sociale. Analiza importanței fiecărui criteriu a condus la coeficienții de pondere din figura 4.8. Se poate constata importanța primordială acordată criteriului care pretinde o protecție majoră a operatorului. Alte două criterii cu pondere mare abordează aspecte economice ale debitării – productivitatea și lățimea tăieturii, normale pentru procedee de prelucrare, de regulă primare. Aceleași motive au condus la ponderi ne semnificative pentru criterii tehnice caracteristice prelucrărilor de finisare. Mai poate fi identificată o pondere destul de mare a criteriului prin care se impune existența unui utilaj specific procedurii de debitare sau, în cazul inexistenței acestuia, dificultatea în ceea ce privește concepția și realizarea unui utilaj nou. Cu o pondere identică se situează criteriul economic – consumul de scule.

Următoarea etapă de analiză constă în selectarea procedurilor de debitare care pot fi utilizate la debitarea aluminiului și a aliajelor lui. La selectarea acestor procedee se pot avea în vedere fie situații concrete ale unor cazuri particulare sau, așa cum se procedează în cazul de față, se pot alege toate sau aproape toate procedeele aplicabile.

Procedeele selectate sunt supuse, la rândul lor unor analize comparative urmărindu-se importanța și efectele tehnico-economice ale fiecărui criteriu de evaluare (tabelul 4.2.). Aplicând coeficienții de pondere pentru fiecare criteriu de evaluare rezultă un punctaj pentru fiecare procedeu de debitare, punctaj care clasifică și ierarhizează aceste procedee (fig. 4.9.).

Din figura 4.9. rezultă clar că din cele 15 procedee de debitare utilizabile la debitarea aluminiului și a aliajelor lui, numai patru procedee depășesc 400 puncte. Dintre acestea două sunt procedee considerate convenționale (debitarea cu disc abraziv, respectiv prin fricțiune) iar celelalte două fac parte din categoria procedurilor acceptate ca neconvenționale (debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact, respectiv prin eroziune electrică complexă-electrică și electrochimică)

Tabelul 4. 2.

Analiza comparativă a procedeelor de debitare a aliajelor de aluminiu

Nr. crt.	Criterii de evaluare Procedeu de debitare	TEHNICE			ECONOMICE					SOCIALE			
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	
1.	STRUNJIRE	1	6	6	2	2	5	4	1	6	6	2	333,83
2.	FREZARE	1	6	6	2	2	5	4	1	6	6	3	338,45
3.	FIERESTRĂU ALTERNATIV	1	5	5	1	2	5	4	2	6	6	3	330,76
4.	FIERESTRĂU PANGLICĂ	1	5	5	2	2	5	4	2	4	5	3	306,15
5.	DISC ABRAZIV	1	5	5	2	2	5	4	1	3	4	3	247,71
6.	FRICȚIUNE	6	4	5	6	2	4	4	6	4	3	4	428,42
7.	FORFECARE LA RECE	6	2	5	4	2	2	6	6	4	2	4	438,46
8.	FORFECARE LA CALD	1	6	6	6	6	5	1	1	2	1	1	315,39
9.	ARC ELECTRIC	1	4	6	6	6	5	1	1	2	1	1	312,31
10.	PLASMĂ	4	1	1	1	1	1	5	4	2	1	6	243,09
11.	OXIGAZ	2	1	1	6	1	1	5	3	2	2	6	296,92
12.	EROZIUNE ELECTRICĂ	4	1	1	1	1	1	5	4	2	1	6	243,10
13.	EROZIUNE ELECTRICĂ	1	5	5	4	5	3	4	1	6	6	3	389,22
14.	E.E.R.C.	6	2	2	6	3	6	5	6	4	3	4	473,74
15.	EROZIUNE COMPLEXĂ	5	3	4	4	4	6	6	5	3	3	4	464,62

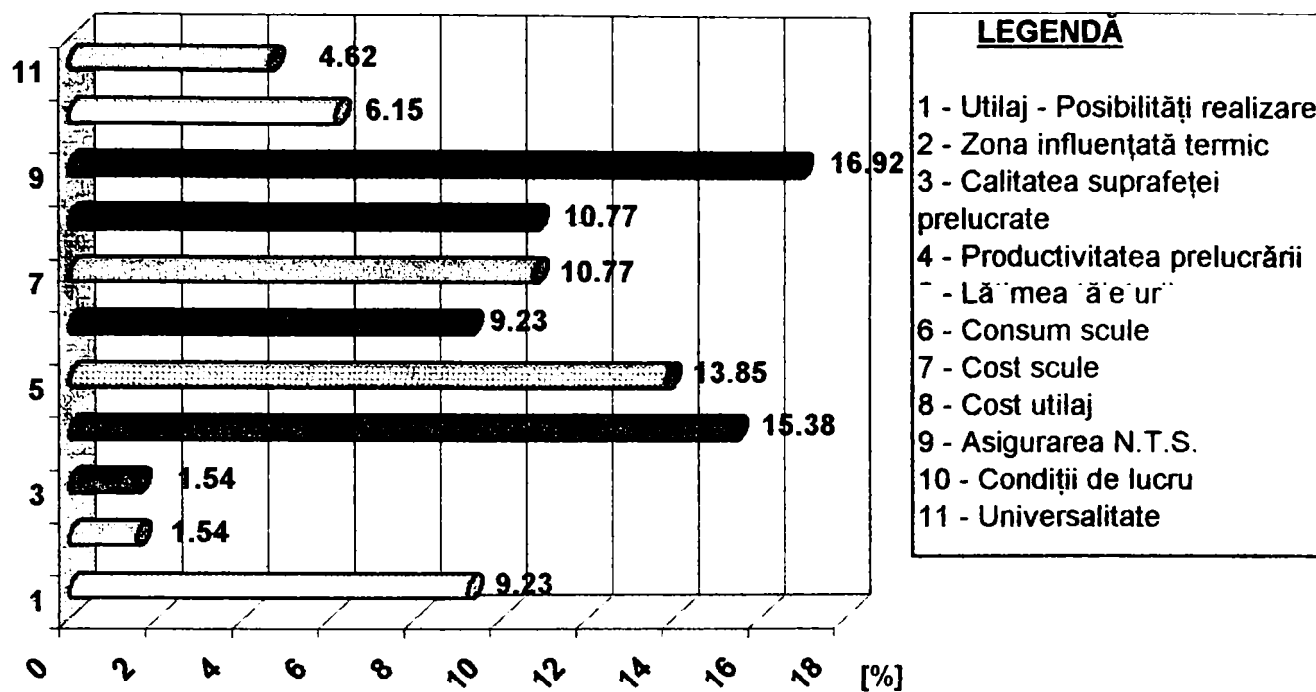


Fig. 4. 8. Coeficienții de pondere la debitare a aliajelor de aluminiu.

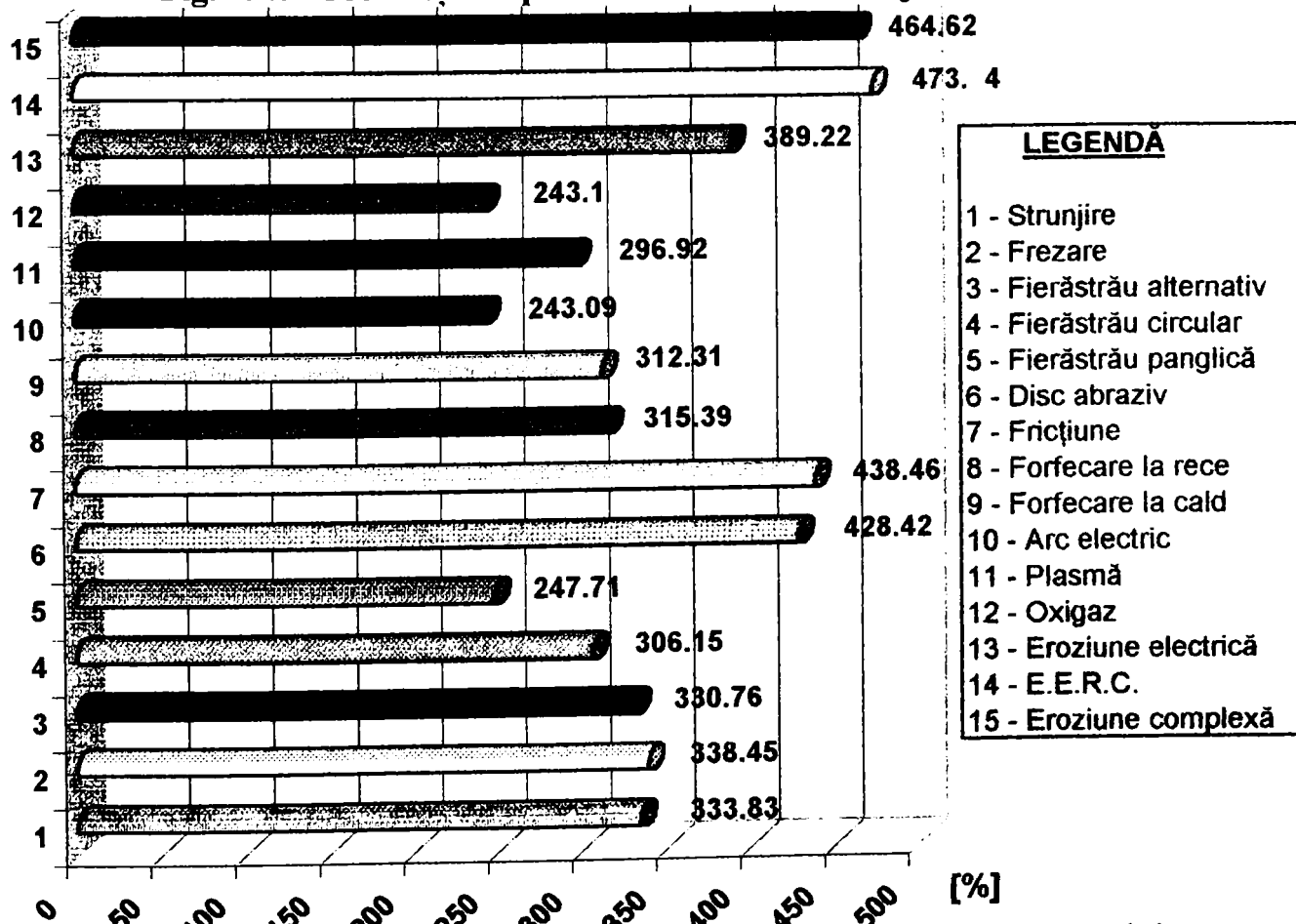


Fig. 4.9. Ierarhizarea procedeelor de debitare a aliajelor de aluminiu.

Din analiza efectuată se desprinde limpede posibilitatea de utilizare, în condiții tehnico-economice deosebit de favorabile a debitării aluminiului și a aliajelor lui prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Cu toate că analiza efectuată mai sus conține o oarecare doză de subiectivism, ea devine totuși obiectivă prin numărul mare de aspecte pe care le analizează. Pe de altă parte, subiectivismul metodei poate fi chiar accentuat atunci când analiza trebuie să țină cont de anumite restricții proprii unor situații particulare, proprii.

5. COMPLEXUL MECANISMELOR FIZICE ELEMENTARE PARTICIPANTE LA PRELUCRAREA PRIN E.E.R.C. .

5.1. Surse termice la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact (E.E.R.C.) are loc la suprafața a două obiecte - obiect de prelucrat (O.P.) și obiect de transfer (O.T.) - conectate la o sursă de energie electrică și care se află într-o mișcare relativă cu o viteză v unul față de celălalt (fig.5.1).

Cele două obiecte sunt aduse în contact nemijlocit prin acțiunea unei forțe F care determină dezvoltarea unei presiuni p . Cum însă, suprafața de contact a obiectului de prelucrat, respectiv a obiectului de transfer se caracterizează printr-o microgeometrie spațială, atât sub aspect dimensional și lege de distribuție, cât și sub aspectul deformării asperităților, se poate considera contactul real între cele două obiecte realizat, sub acțiunea presiunii p , doar în câteva microsuprafețe determinate de proeminențele rugozității (fig.5.2).

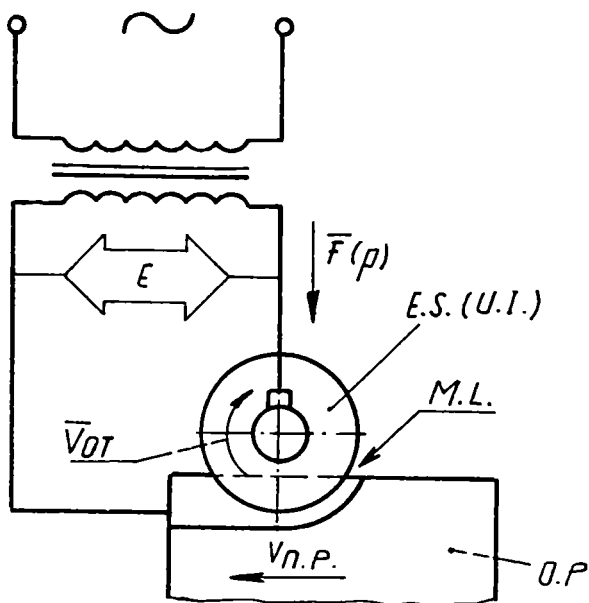


Fig.5.1. Schema de principiu a prelucrării prin E.E.R.C.

Problema 'eterminăr' ariei reale d contact (A_r) este dificilă, dar prin acceptarea unor con "ț" restric'tive ea poate fi totuș determinată. [56], [61]. În este prezentată o varaintă pentru determinarea analitică a ariei reale de contact pornind de la necesitatea menținerii constante a presiunii între obiectul de prelucrat și cel de transfer.

Admițând menținerea deformațiilor macroscopice în domeniul stric elastic (se admit valabile relațiile herziene privind geometria suprafețelor de contact) sunt analizate două cazuri de prelucrare posibilă

prin E.E.R.C. (fig.5.3).

Obiectul de transfer este un disc metalic de rază R_1 și grosime a , iar obiectul de prelucrat un semifabricat tip cilindru de rază R_2 , respectiv un semifabricat prismatic de lățime B și înălțime H .

Cum elementele în inetrațiune reprezintă doi cilindri cu axe paralele, suprafața de contact este considerată, la limită, având forma unei fâșii limitată de două drepte paralele.

Conform figuri 5.3, la momentul $t=0$ (începutul prelucrării) contactul între elementele în interacțiune este exterior, dar la orice $t>0$ contactul între obiectul de transfer și obiectul prelucrării devine cilindric interior (fig.5.4).

Valoarea presiunii maxime de contact se poate exprima prin:

$$p_o = 0,5642 \sqrt{\frac{q}{\eta} \cdot \frac{R_2^* - R_1}{R_1 \cdot R_2^*}}, \quad (5.1)$$

unde q reprezintă intensitatea liniară a distribuției sarcinii pe lungimea cilindrului, dată de relația (5.2):

$$q = 3 \frac{F}{4} h, \quad (5.2)$$

și η - constanta elastică a materialelor corpurilor în contact (5.3):

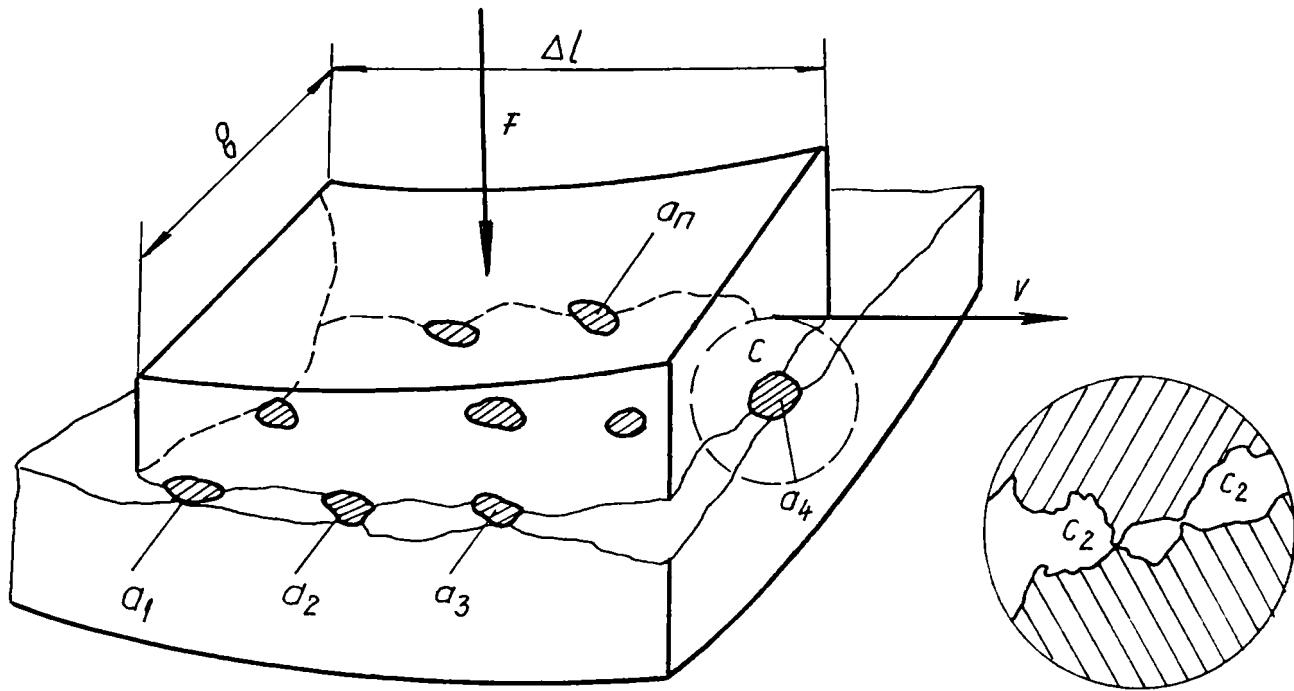


Fig.5.2. Contactul real în zona de interacțiune O.P.-O.T.

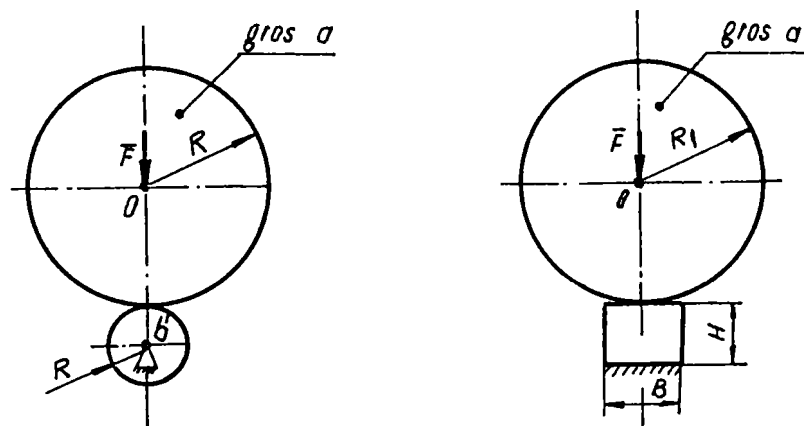


Fig.5.3. Contactul inițial obiect de prelucrat-obiect de transfer.

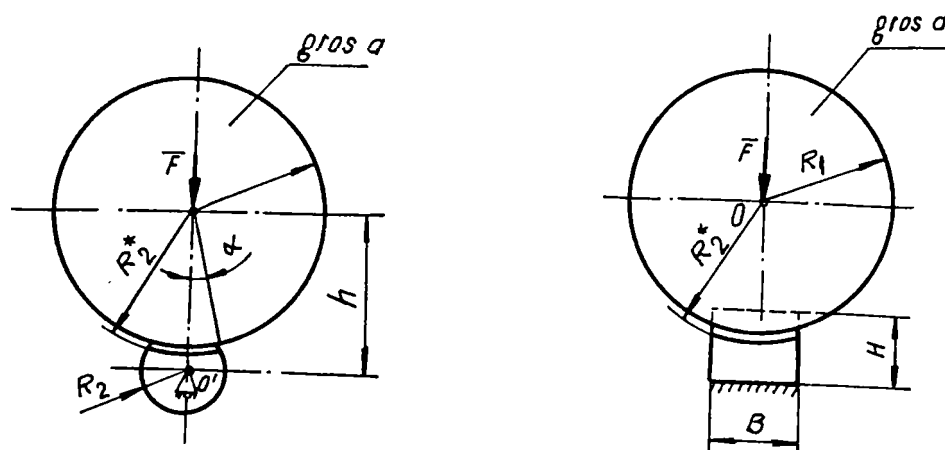


Fig.5.4. Contactul elementelor în interacțiune în timpul prelucrării.

$$\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (5.3)$$

$$p_o = \frac{3}{2} \frac{F}{A_n} \quad (5.4)$$

(μ_1, μ_2 - coeficienții lui Poisson, E_1, E_2 -modulul de elasticitate; materialul obiectului de transfer - indice 1 și materialul obiectului de prelucrat - indice 2).

Pe de altă parte presiunea maximă p_0 , între obiectul de prelucrat și cel de transfer, poate fi exprimată prin forța exterioară F care acționează asupra semielipsoidului de contact (5.4). [104].

În condițiile prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact, unde obiectul de transfer pătrunde în masa obiectului de prelucrat, diferența dintre R_1 și R_2^* este determinată exclusiv de valorile microneregularităților suprafețelor în interacțiune și a bățiilor radiale ale obiectului de transfer. Această diferență poate fi evaluată la valori de ordinul zecimilor de milimetru. Prin urmare aria teoretică a fâșiei de contact poate fi aproximată cu aria aparentă dedusă din considerente geometrice. Aproximarea este justificată și de faptul că lățimea fâșiei de contact calculată se află în ordinul de mărime a lățimii nominale.

Aria aparentă, nominală se exprimă prin (5.5):

$$A_n = 2 R_1 a \arccos \frac{R_1^2 - R_2^2 + h^2}{2 h R_1} \quad (5.5)$$

Datorită mișcării relative între obiectele în interacțiune aria aparentă, nominală statică se corectează cu un factor care depinde de coeficientul de frecare cinematic μ_c :

$$A_{nc} = A_n(1 + \mu_c^2) = 2 R_1 a (1 + \mu_c^2) \arccos \frac{R_1^2 - R_2^2 + h^2}{2 h R_1} \quad (5.6)$$

Din (5.1) și (5.4), ținând cont de (5.2) rezultă expresia forței maxime de apăsare admisibilă menținerii deformațiilor în domeniul elastic (5.7).

$$F = 0,4244(1 + 0,5 \mu_c^2) \frac{a R_1 (R_2^* - R_1)}{R_2} \arccos^2 \frac{R_1^2 - R_2^2 + h^2}{2 h R_1} \quad (5.7)$$

Din analiza expresiei forței maxime teoretice, rezultă o dependență redusă a ei de viteza relativă între obiectele în interacțiune. Ea este însă influențată de valoarea h , adică de către distanța variabilă între axa obiectului de prelucrat și cea a obiectului de transfer.

La această variație a forței de apăsare, se asigură contactul pe întreaga zonă de interacțiune între obiectul de transfer și obiectul prelucrării. Depășirea ei poate conduce, prin deformațiile plastice provocate, la creșterea suprafeței de contact cu influențe nefavorabile asupra mecanismului de amorsare a microarcelor electrice.

În cazul semifabricatelor prismatice (fig.5.4) aria nominală rămâne constantă (5.8) după pătrunderea obiectului de transfer pe toată lățimea B :

$$A_n = 2 R_1 a \arcsin \frac{B}{2 R_1} \quad (5.8)$$

Prin urmare expresia forței de apăsare F devine (5.9):

$$F = 0,4244(1 + 0,5 \mu_c^2)^2 \frac{aR_1(R_2^* - R_1)}{\eta R_2^*} \arcsin^2 \frac{B}{2R_1} \quad (5.9)$$

Calcululele numerice efectuate au evidențiat valori ale presiunii aparente, care coincid cu valorile prezentate în literatura de specialitate. [15], [18], [26], [108].

Importanța exprimării analitice a forței maxime necesare prelucrării este evidențiată și de posibilitatea ce o oferă la determinarea unor mărimi necesare, stabilirii regimurilor electrice optime.

În timpul prelucrării contactul între O.P. și O.T. se realizează pe o arie reală A_r , care se poate exprima (5.10):

$$A_r = \frac{2F}{\sigma} \quad (5.10)$$

în care σ este efortul unitar de strivire.

Deci aria reală pentru semifabricatele cilindrice are expresia (5.11) și (5.12) pentru semifabricatele prismatice.

$$A_r = 0,8488(1 + 0,5 \mu_c^2)^2 \frac{aR_1(R_2^* - R_1)}{\sigma \eta R_2^*} \arccos^2 \frac{R_1^2 - R_2^2 + h^2}{2hR_1} \quad (5.11)$$

$$A_r = 0,8488(1 + 0,5 \mu_c^2)^2 \frac{aR_1(R_2^* - R_1)}{\sigma \eta R_2^*} \arcsin^2 \frac{B}{2R_1} \quad (5.12)$$

Din analiza comparativă a relațiilor (5.11) cu (5.5) respectiv (5.12) cu (5.6) rezultă că aria reală are valori mult mai mici decât cele ale ariei aparente, nominale.

Pe lângă contactele care determină existența ariei reale, între cele două obiecte pot exista microproeminențe aparținând obiectului prelucrării respectiv obiectului de transfer care în anumite momente se pot afla la distanțe foarte mici una față de cealaltă, neexistând un contact mecanic între ele (fig.5.5).

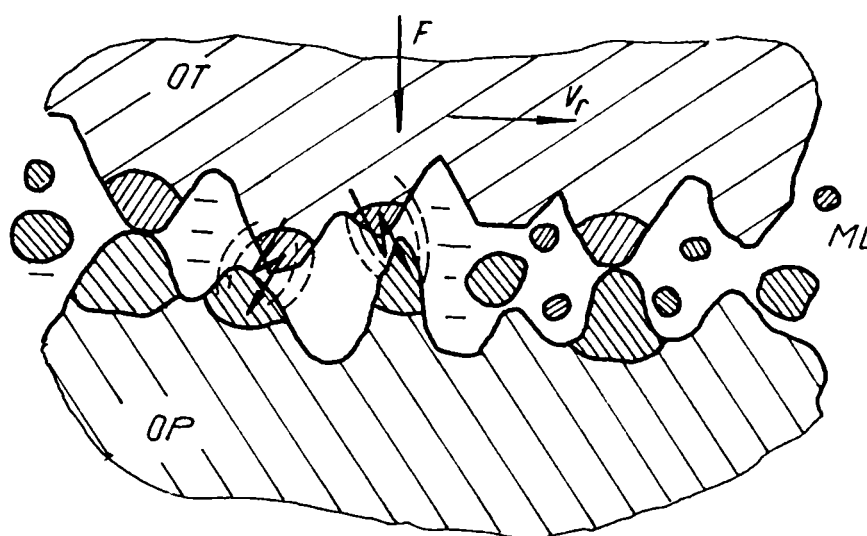


Fig.5.5. Poziția relativă a microneregularităților O.P. și O.T.

În aceste condiții și ținând cont de mișcarea relativă, respectiv presiunea existentă între obiectul prelucrării și cel de transfer pot fi evidențiate următoarele cauze care conduc la îndepărtarea de material la suprafața O.P. (și la suprafața O.T.) (fig.5.6).

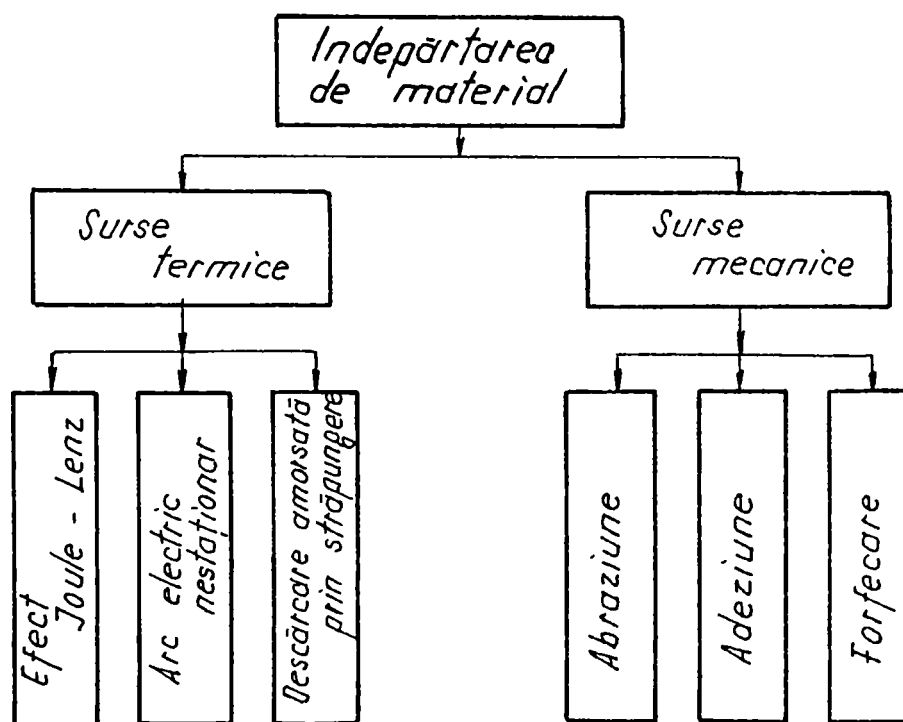


Fig.5.6. Cauze care contribuie la îndepărtarea de material la prelucrarea prin E.E.R.C.

Existența surselor termice este evidențiată atât vizual prin lumina puternică care însoțește prelucrarea, prin modificările de structură în straturile superficiale ale obiectului prelucrării, de apariția microfisurilor în același strat superficial și, nu în ultimul rând, prin forma preponderent sferică pe care o capătă materialul îndepărtat.

Existența surselor mecanice de îndepărtare a materialului la suprafața celor două obiecte poate fi constatată prin formele lamelare neregulate care o au o parte a produselor eroziunii cât și de aspectul lucios, cu rizuri a unor zone ale suprafețelor prelucrate.

5.2. Îndepărtarea de material prin efect Joule-Lenz.

Aplicarea tensiunii de alimentare la nivelul contactului mecanic nemijlocit a două microneregularități ale obiectului prelucrării și ale obiectului de transfer determină o creștere însemnată a densității de curent datorită stricțiunii puternice a liniilor de curent, ce sunt obligate să treacă printr-o suprafață foarte mică. Parcurgerea de către curent a contactului caracterizat printr-o rezistență R_c conduce la dezvoltarea unei cantități de căldură Q prin efect Joule-Lenz, cantitate de căldură care poate fi determinată cu relația (5.13): [2]

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot (R_c + 2R_t) \cdot t \quad (5.13)$$

în care I este intensitatea curentului care parcurge microcontactul; R_t rezistența electrică a O.P., respectiv O.T. și t - timpul de existență a microcontactului.

În realitate aria reală se materializează în "n" microsuprafețe de contact ceea ce determină existența unei scheme electrice echivalente conform figurii 5.7.

Existența acestor rezistențe R_1, R_2, \dots, R_n parcurse de curent conduce la dezvoltarea de căldură prin efect Joule-Lenz, în mai multe microcontacte, căldură capabilă să topească sau chiar să vaporizeze microvolume din materialul obiectului prelucrării și a obiectului de transfer.

Din analiza relației (5.13) se constată că este posibilă influențarea cantității de căldură dezvoltate atât prin rezistența de contact R_c cât și prin timpul de existență a microcontactului t (rezistența R_t - foarte mică în raport cu R_c poate fi neglijată, iar I este un parametru de reglare, dependent de capacitatea sursei de alimentare).

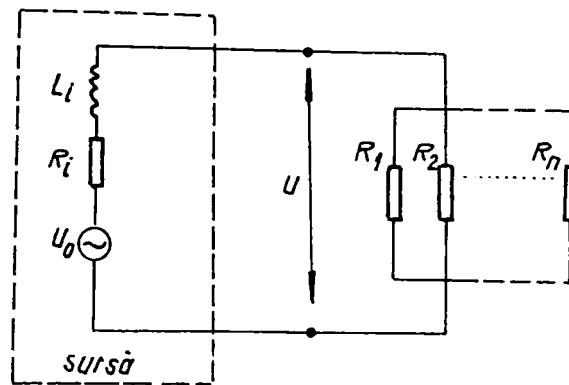


Fig.5.7. Schema electrică echivalentă
a contactului real O.P.-O.T.

5.2.1. Determinarea rezistenței de contact (R_c).

Rezistența de contact R_c este obținută prin atingerea sub acțiunea forței de apăsare a obiectului de transfer spre obiectul prelucrării care conduce la formarea unui contact electric la nivelul unor proeminente.

Din punct de vedere electric, contactul electric se definește ca fiind un ansamblu compus din două piese metalice prin a căror atingere se stabilește conducția într-un circuit electric.

Din punct de vedere fizic, contactul electric este ansamblul compus din două semispații (electrozi), conectate la o sursă de curent electric. Plecând de la forma geometrică a celor două suprafețe ce formează cuplul de contact se deosebesc următoarele tipuri de contacte: punctiforme, liniare și plane (fig.5.8).

În cazul a două suprafețe ce conțin o infinitate de microneregularități ce se ating, contactul electric ca sursă termică de proces, se realizează în momentul atingerii fizice (mecanice) între cele mai proeminente microneregularități ale obiectului de prelucrat și ale obiectului de transfer.

Contactul microneregularităților, crează o creștere a rezistenței electrice, comparativ cu rezistența unui conductor ce ar avea suprafața egală cu suma suprafețelor microneregularităților aflate

în contact. Prin urmare rezistența totală a contactului poate fi considerată ca fiind compusă din două componente: rezistența proprie a corpului de contact R_γ și rezistența propriuzisă a contactului electric R_c (5.14).

$$R = R_\gamma + R_c \quad (5.14)$$

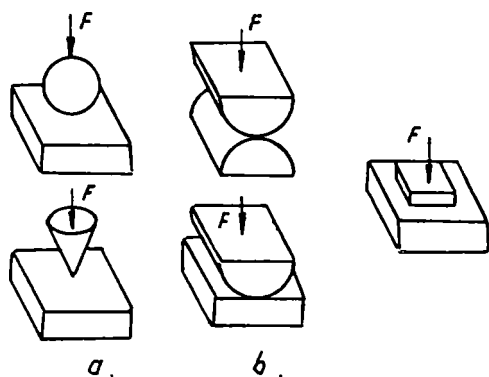


Fig.5.8. Tipuri de contacte electrice.

Rezistența R_γ este determinată de aria microneregularităților și de caracteristicile materialului electrozilor iar rezistența propriuzisă de contact R_c poate fi considerată ca fiind compusă și ea din două componente: din rezistența de trecere R_t condiționată de prezența microneregularităților pe suprafața de contact a celor două obiecte și din rezistența R_p condiționată de formarea de pelicule superficiale (5.15):

$$R_c = R_t + R_p \quad (5.15)$$

Rezistența de trecere R_t reprezintă o caracteristică fizică importantă pentru toate tipurile de contacte iar rezistența R_p poate fi neglijată în cazurile în care intervine o forță de apăsare F între cele două elemente aflate în interacțiune.

Pentru clarificarea naturii rezistenței de trecere R_t se va examina zona de trecere a curentului între suprafețele celor două obiecte aflate în contact. În acest caz la scară microgeometrică imaginea rezultată este cea a unei mulțimi de punți de contact, condiționate de existența microneregularităților suprafețelor celor două obiecte aflate în contact (fig.5.2).

În aceste puncte de contact se dezvoltă mari densități de curent ce conduc la încălzirea, topirea și chiar vaporizarea punților de legătură prin efect Joule-Lenz.

Datorită secțiunilor îngustate prin care trece curentul, densitățile de curent vor crește mult față de profunzimea celor două obiecte datorită concentrării puternice a liniilor de curent (fig.5.9).

S-a arătat că două suprafețe aflate în contact se caracterizează prin existența unei arii aparente, nominale de contact A_n și a unei arii reale de contact A_r .

Între cele două arii poate fi determinat raportul a (5.16):

$$a = A_r / A_n \quad (5.16)$$

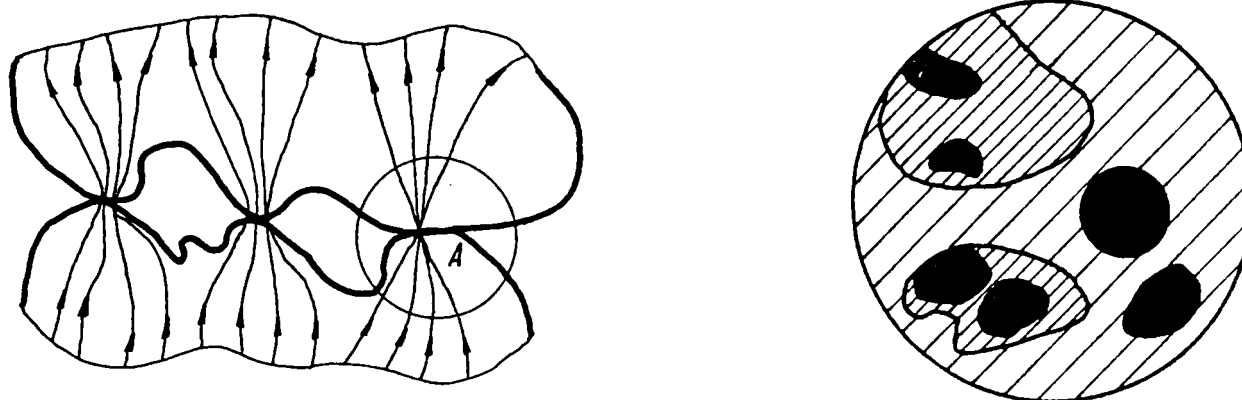


Fig.5.9. Stricțiunea liniilor de curent în microsuprafețele de contact electric ale O.P. cu O.T.

la determinarea rezistenței de trecere se poate apela la modelul Holm de elipsoid turtit, format din două spații confocale de conductivitate finită și de la ecuația de bază a teoriei potențialelor, care consideră rezistivitatea la locul îngustării constantă, deci fără cădere de temperatură. Pe de altă parte se consideră că suprafețele echipotențiale reprezintă un elipsoid care pe măsură ce se îndepărtează de zona de contact se apropie de sfere, dacă se consideră cele două semiaxe egale.

La o tensiune constantă rezultă o intensitate a curentului variabilă în condițiile existenței unei rezistențe variabile. Cum însă rezistența este o mărime ce depinde de natura materialului, lungimea și aria secțiunii sale (5.17) în cazul contactelor reale ale suprafețelor rezistența de contact R_c va fi determinată de rezistența tuturor punctelor de contact:

$$R = \rho \cdot l/A_r \quad (5.17)$$

Forța de contact obținută prin apăsarea obiectului de transfer asupra obiectului supus prelucrării conduce la o creștere a ariei reale ținând cont de rezistența la strivire a materialului obiectului de prelucrat σ (5.18):

$$\sigma = F / A_r \quad (5.18)$$

în care F forța de apăsare pe contact.

În cazul unui contact punctiform de formă conică (formă ce aproximează forma microneregularităților), în urma aplicării forței de apăsare F , va apare o deformație la vârful conului rezultă un trunchi de con (fig.5.10).

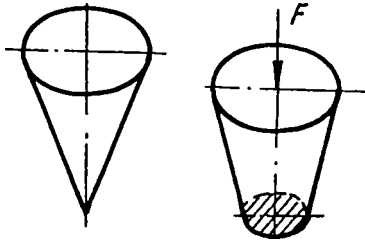


Fig.5.10. Forma teoretică inițială și finală a contactului electric.

Dacă se aproximează baza mică a conului cu un cerc de arie S_0 și rază r și admitând materialul ca omogen se poate obține expresia rezistenței de trecere (5.19):

$$R_t = \frac{\epsilon_0}{\gamma \cdot C} \quad (5.19)$$

unde $\epsilon_0 = 10^{-11} / 4\pi g$ - constanta dielectrică a vidului [F/cm], C - capacitatea între electrozi [F]; $\rho = 1/\gamma$ - rezistivitatea materialului [Ωcm].

Rezistența electrică pentru o singură parte a contactului (contactul la nivelul microneregularității obiectului de prelucrat) este (5.20):

$$R_o = \frac{\epsilon_0 \cdot \rho}{C_o} \quad (5.20)$$

unde C_o este capacitatea unei semifere cu diametrul egal cu $2r$.

Dacă C este capacitatea totală a unui contact atunci se poate admite $C_o = C/2$.

Conform ipotezelor lui Holm [59], dacă se consideră elipsoidul de bază turtit, atunci suprafața de contact este o elipsă (fig.5.11), iar expresia elipsoizilor confocali este (5.21):

$$\frac{x^2}{\alpha^2 + \mu} + \frac{y^2}{\beta^2 + \mu} + \frac{z^2}{\mu} = 1 \quad (5.21)$$

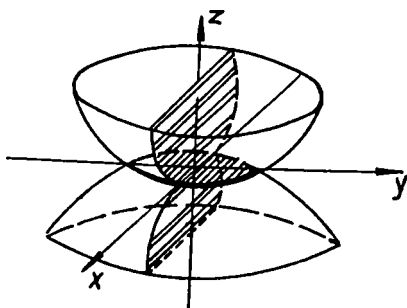


Fig.5.11. Contactul conform ipotezelor lui Holm.

unde α și β sunt semiaxele elipsoidului de bază, turtit în planul xoy. Elipsoizii confocali sunt definiți de parametrul μ ($\mu=0,1 \cdot r^2$; $\mu=0,5 \cdot r^2$; $\mu=2 \cdot r^2$; $\mu=5 \cdot r^2$), cu r raza zonei de contact.

În aceste condiții semiaxele sunt:

- după axa x - $(\alpha^2 + \mu)^{0,5}$;
- după axa y - $(\beta^2 + \mu)^{0,5}$;
- după axa z - $\mu^{0,5}$ (fig.5.12).

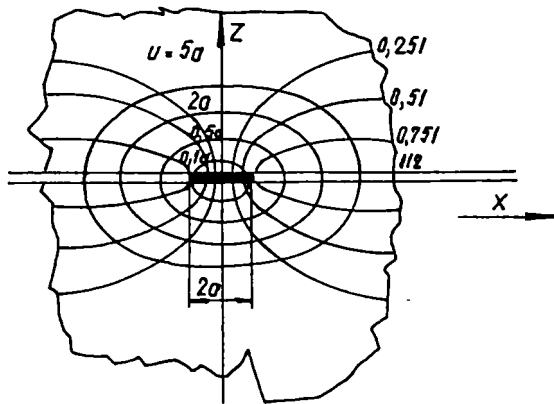


Fig.5.12. Semiaxele elipsoidului de contact.

Potențialul φ al suprafeței va fi (5.22):

$$\varphi = \frac{Q}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \int_0^\mu \frac{d\mu}{\sqrt{(\alpha^2 + \mu) \cdot (\beta^2 + \mu) \cdot \mu}} \quad (5.22)$$

unde μ - permeabilitatea magnetică; $d\mu$ - distanța între două suprafețe echipotențiale vecine.

$$C_0 = \frac{C}{2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\int_0^\mu \frac{d\mu}{\sqrt{(\alpha^2 + \mu) \cdot (\beta^2 + \mu) \cdot \mu}}} \quad (5.23)$$

În aceste condiții capacitatea între elipsoidul de bază și a unui elipsoid confocal cu el este (5.23):

Dacă se admite că elipsa de contact poate fi aproximată cu un cerc de rază $r = \alpha = \beta$ și dacă μ tinde spre α se obține (5.24):

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\int_0^\infty \frac{d\mu}{\sqrt{(r^2 + \mu)^2 \cdot \mu}}} = \frac{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\int_0^\infty \frac{d\mu}{(r^2 + \mu) \cdot \sqrt{\mu}}} \quad (5.24)$$

Notând cu I expresia de la numitorul relației (5.24) în condițiile anterioare se obține (5.25):

$$I = \frac{\pi}{r} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right) = \frac{\pi}{r} \quad (5.25)$$

care înlocuită în expresia capacității contactului conduce la (5.26):

$$C_o = \frac{C}{2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_o}{\frac{\pi}{r}} = 4 \cdot r \cdot \epsilon_o \quad (5.26)$$

Inlocuind pe C_o în expresia lui R_o se poate obține rezistența electrică a unui semicontact (5.27):

$$R_o = \frac{\epsilon_o \cdot \rho}{4 \cdot r \cdot \epsilon_o} = \frac{\rho}{4 \cdot r} \quad (5.27)$$

În aceste condiții valoarea rezistenței de trecere R_t va fi (5.28):

$$R_t = \rho / 2 \cdot r \quad (5.28)$$

iar pentru un contact multipunctiform cu n puncte de contact rezistența de trecere va avea expresia (5.29):

$$R_t = \rho / 2 \cdot r \cdot n \quad (5.29)$$

Prin explicitarea lui r din expresia ariei ($S_o = \pi \cdot r^2$) și pentru un material oarecare cu n puncte de contact, aria reală a suprafeței de contact se exprimă (5.30):

$$S_o \cdot n = A_r = \pi \cdot r^2 = F / \sigma \quad (5.30)$$

iar valoarea aproximativă a razei de contact este (5.31):

$$r = \sqrt{\frac{F}{\sigma \cdot \pi \cdot n}} \quad (5.31)$$

Rezultă că valoarea rezistenței de trecere va putea fi determinată (5.32):

$$R_t = \frac{\rho}{2 \cdot n \cdot \sqrt{\frac{F}{\sigma \cdot \pi \cdot n}}} = \frac{\rho}{2 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot n}{\sigma \cdot \pi}}} \quad (5.32)$$

Din punct de vedere fizic numărul punctelor de contact "n" depinde de forța de apăsare între obiectul de prelucrat și cel de transfer $n = f(F)$. În primele momente ale prelucrării contactul mecanic nemijlocit se realizează într-un număr mic de puncte, care se vor strivi ușor ducând la apropierea mai mare a suprafețelor O.P. și O.T., deci și la apariția a noi puncte de contact. Procesul continuă până când presiunea de apăsare depășește valoarea lui σ pentru materialul din care este confecționat obiectul de prelucrat. În mod aparent din relația de exprimare a presiunii ($p=F/S_o \cdot n$) rezultă o creștere proporțională a numărului punctelor de contact cu creșterea forței de apăsare, dar peste anumite valori apare, evident o dependență de deformația materialului (5.33):

$$n = f(p) = k_n \cdot \frac{F^b}{S_o \cdot n} \quad (5.33)$$

Astfel, expresia rezistenței de trecere va fi (5.34):

$$R_t = \frac{\rho}{2 \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{k_n}}{\pi \cdot \sigma \cdot \sqrt{S_o}} \cdot F^{\frac{b+2}{4}}}} \quad (5.34)$$

Dacă se grupează termenii referitori la material în coeficienții globali k și m (5.35) rezultă expresia simplificată a rezistenței de trecere (5.36):

$$k = \frac{\rho}{2 \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{k_n}}{\pi \cdot \sigma \cdot \sqrt{S_o}}}} \quad m = \frac{b+2}{4} \quad (5.35)$$

Deoarece determinarea rezistenței de trecere cu relația (5.36) presupune cercetări experimentale în vederea determinării constantelor k și m se impune încercarea determinării unor relații analitice prin care să se elimine subiectivismul posibil și consumul mare de timp al experimentărilor. Mai mult, cunoașterea dependenței dintre materialul obiectului de prelucrat și cel al obiectului de transfer, dintre forța de apăsare și rezistența de trecere, poate oferi informații suplimentare asupra intimității fenomenului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact unde, obiectul de transfer este de regulă sub formă de disc și unde, la limită, se poate considera contactul între cele două elemente în interacțiune ca fiind realizat între un cilindru de rază r și un plan de rază infinită.

Acceptarea condițiilor unui contact punctiform de formă aproximativ circulară și a unei deformații elastice între cele două obiecte în interacțiune, conduce la faptul că mărirea razei reale de contact a_r între obiectul prelucrat și obiectul de transfer se poate determina cu relația lui Hertz (5.37):

$$a_r = \left(\frac{3}{4} \cdot F \cdot \left(\frac{1 - \sigma_1^2}{E_1} + \frac{1 - \sigma_2^2}{E_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.37)$$

unde a_r raza suprafeței circulare de contact; F - forța de apăsare pe contact; σ_1 - coeficientul Poisson al O.P.; σ_2 - coeficientul Poisson al O.T.; E_1, E_2 - modulul de elasticitate ($E=2,1 \cdot 10^6$ [daN/cm²]); r_1, r_2 - razele aproximative ale celor două obiecte.

$$a = \left(1,5 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot \frac{F \cdot r}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.38)$$

Ținând cont că unul dintre principalele avantaje ale prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact este rolul neglijabil al materialului obiectului de transfer în proces, ceea ce conduce la utilizarea pentru confecționarea acestuia a unor materiale puțin pretențioase - de obicei OL 37, adică oțel, se poate considera că la prelucrarea unor obiecte din oțel caracteristicile mecanice au valori aproximativ egale, adică σ_1, σ_2 și E_1, E_2 . În aceste condiții relația (5.37) se exprimă simplificat (5.38): iar dacă se consideră r și E mărimi constante rezultă (5.39):

$$a = F^{\frac{1}{3}} \quad (5.39)$$

Ținând cont de (5.28) relația de dependență între rezistența de trecere R_t și forța de apăsare F va fi de forma (5.40):

$$R_t = \frac{\rho}{2 \cdot a} - k \cdot F^{-\frac{1}{3}} \quad (5.40)$$

$$a = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot H}} \quad (5.41)$$

În cazul în care se admite că între cele două microneregularități aflate în contact mecanic nemijlocit, sub acțiunea forței de apăsare F se realizează și o deformare plastică, raza aproximativă a cercului de contact, conform, ipotezelor lui Holm se poate exprima prin relația (5.41): unde H este duritatea materialului obiectului prelucrării; și prin înlocuire în (5.40) expresia rezistenței de trecere va căpăta forma (5.42):

$$r_t = \frac{\rho}{2 \cdot a} = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot H}{F}} - k \cdot F^{-\frac{1}{2}} - k \cdot F^m \quad (5.42)$$

În condițiile reale unde contactul dintre obiectul de prelucrat și cel de transfer are loc în n puncte de contact raza aproximativă a cercului de contact are expresia (5.43):

$$a = \sqrt{\frac{F}{n \cdot \pi \cdot \xi \cdot H}} \quad (5.43)$$

care introdusă în relația (5.42) conduce la expresia rezistenței de trecere de forma (5.44):

$$R_t = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \xi \cdot H}{n}} \cdot F^{-\frac{1}{2}} \quad (5.44)$$

unde ξ este coeficientul Prandl. Din analiza relației (5.44) rezultă că exprimarea valorică a rezistenței de trecere este posibilă numai dacă se cunoaște numărul punctelor de contact, celelalte mărimi fiind dependente fie de materialul obiectului de prelucrat, fie de parametrii de proces.

Pentru determinarea numărului punctelor de contact s-au propus diverse modele, dintre care, o imagine foarte apropiată de realitate. (5.45): [14],

$$n(H,F) = (0,5 \dots 2,5) \cdot 10^{-5} \cdot H^{0,625} \cdot F^{0,2} \quad (5.45)$$

care conduce în final la expresia rezistenței de trecere (5.46):

$$R_t = \frac{\rho}{2,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{\pi \cdot \xi} \cdot H^{0,1875} \cdot F^{-0,6} \quad (5.46)$$

Se constată că expresia rezistenței de trecere astfel determinată are aceeași formă cu cea stabilită anterior, dar coeficientul k are altă expresie fiind dependent exclusiv de materialul obiectului prelucrării.

Pentru exprimarea corectă a coeficientului k se egalează (5.36) cu (5.46) rezultând (5.47):

$$k = \frac{\rho}{2,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{\pi \cdot \xi} \cdot H^{0,1875} \quad (5.47)$$

Pentru această expresie a coeficientului k în literatura de specialitate pot fi găsite valori dependente de diferite cupluri de materiale (tabelul 5.1). În aceste condiții determinarea rezistenței de trecere deci și a cantității de căldură dezvoltată prin efectul Joule-Lenz devine ușoară.

Tabelul 5.1.

Cuplul de materiale	K	m
Aluminiu-aluminiu	$1,342 \cdot 10^{-4}$	0,6
Aluminiu-alamă	$3-6,7 \cdot 10^{-3}$	0,65
Aluminiu-cupru	$0,98 \cdot 10^{-3}$	0,65
Aluminiu-oțel	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,7
Oțel-oțel	$7,6 \cdot 10^{-3}$	0,8
Oțel-alamă	$3,04 \cdot 10^{-3}$	0,8
Oțel-cupru	$3,1 \cdot 10^{-3}$	0,8

La determinarea coeficienților k, n s-a considerat rezistența specifică superficială $R_{ss} = 10^{-12} \Omega$ iar cifra Prandl = 0,45.

5.2.2 Determinarea timpului de existență a microcontactului.

Timpul de existență a microcontactului (t) - factor determinant pentru cantitatea de căldură dezvoltată în microcontact prin efect Joule-Lenz este dificil de determinat atât experimental cât și pe cale analitică. Dificultatea provine din faptul că în spațiul de lucru se desfășoară simultan o multitudine de fenomene, suprafața rezultantă oferind informații numai asupra fenomenului global. Totuși prin admiterea unor ipoteze simplificatoare este posibilă identificarea unei căi de determinare analitică a timpului de existență a contactului electric. Dacă se acceptă forma tronconică (sau cilindrică) a microneregularității cu dimensiunile din figura 5.13, identitatea geometrică formală a microneregularităților la suprafața obiectului de prelucrat și a celui de transfer și menținerea neschimbată a formei inițiale în toată perioada de existență a microcontactului, analize geometrice, completate cu elemente cinematice relevă următoarele:

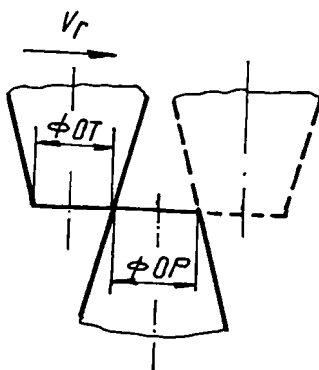


Fig.5.13 Schema pentru determinarea timpului de existență a microcontactului

- timpul de existență a microcontactului t este o mărime direct dependentă de viteza relativă între O.P. și O.T. și de dimensiunile microcontactului;

- acest timp începe în momentul în care cele două proeminențe încep să se apropie una față de cealaltă (stânga) și se încheie în momentul în care proeminențele încep să se distanțeze una față de cealaltă (dreapta);

- în aceste condiții spațiul parcurs cu menținerea contactului mecanic nemijlocit între microneregularități este determinat de dimensiunile lor (5.48):

$$S = \phi_{OT} + \phi_{OP} \tag{5.48}$$

- considerând viteza relativă v_r dintre cele două microneregularități egală cu viteza relativă între cele două obiecte în interacțiune, rezultă timpul de existență a microcontactului (5.49):

$$t = \frac{\phi_{OP} + \phi_{OT}}{v_r} \tag{5.49}$$

În tabelul 5.2 se prezintă câteva valori ale timpului de existență a microcontactului t pentru cazuri, care din punct de vedere teoretic pot fi acceptate și care pot fi considerate limite superioare.

Tabelul 5.2.

Nr. crt.	ϕ_{OP} [mm]	ϕ_{OT} [mm]	v_r [m/s]	t (s)
1.	1	1	20	0,0001
2.	1	0,5	20	0,000075
3.	0,5	0,5	20	0,00005
4.	0,5	0,25	20	0,0000375
5.	1	1	30	0,00006
6.	1	0,5	30	0,00005
7.	0,5	0,5	30	0,000033
8.	0,5	0,25	30	0,000025
9.	1	1	40	0,00005
10.	1	0,5	40	0,0000375
11.	0,5	0,5	40	0,000025
12.	0,5	0,25	40	0,0000187

Se constată durate foarte mici (max. 100 μ s) în care energia oferită contactului se transformă în căldură prin efect Joule-Lenz.

Cu toată durata redusă prin utilizarea relațiilor prezentate anterior și utilizând relația (5.50) de transformare a cantității de căldură în diferență de temperatură pot fi determinate temperaturile la sfârșitul duratei de contact, de ordinul $10^3 \dots 10^5$, ceea ce scoate în evidență faptul că materialul obiectului prelucrării ajunge, ca urmare a efectului Joule-Lenz, chiar în stare de vapori.

$$Q = m \cdot c \cdot (T_{final} - T_{inițial}) \text{ [J]} \quad (5.50)$$

în care m - masa microneregularității [Kg]; c - căldura specifică a materialului din care este confecționat O.P. (sau O.T.); [J/KgK]; T_{final} - temperatura la sfârșitul duratei de contact a microneregularităților [K]; $T_{inițial}$ - temperatura inițială [K].

Și aceste calcule au fost efectuate acceptând unele ipoteze simplificatoare, dintre care principalele sunt:

- nerespectarea efectului de polaritate (constatat experimental) prin repartiția identică a cantității de căldură dezvoltate prin efect Joule-Lenz la ambele obiecte în interacțiune;
- materialul din care sau considerat confecționate obiectul de prelucrat și cel de transfer este identic (oțel);
- forma și dimensiunile unei microneregularități în conformitate cu figura 5.13 și tabelul 5.2. [26], [30], [51], [37], [108].

În literatura de specialitate se prezintă influențele pe care parametrii electrici și cei mecanici, care participă la procesul de prelevare de material, le au asupra rezistenței de contact și implicit asupra temperaturii la care ajunge microneregularitatea. Sunt prezentate dependențele rezistenței de contact de presiunea de zona de contact, de temperatura zonei de contact și dependența temperaturii contactului electric de tensiunea de alimentare și de forța de apăsare a obiectului de transfer pe obiectul supus prelucrării.

Cu toate acestea calculele estimative efectuate anterior pot fi considerate acoperitoare.

5.3. Îndepărtarea de material prin arc electric nestaționar.

Dezvoltarea cantităților mari de căldură prin efect Joule-Lenz au o consecință directă - topirea și vaporizarea unor microvolume de material la suprafața obiectului prelucrării, dar și o consecință indirectă asupra mecanismului de prelevare de material. Existența metalului topit și a mișcării relative între O.P. și O.T. favorizează amorsarea și dezvoltarea arcului electric în momentul în care contactul electric dintre microneregularități este întrerupt (rupt).

Conform [17], [11], deplasarea microneregularității de pe suprafața O.T. față de cea de pe suprafața O.P. în zona de contact apare un câmp electric foarte puternic care asigură o emisie autoelectronică suficientă pentru amorsarea arcului și trecerea la emisia termoelectronică preponderentă.

Efectele câmpului electric foarte intens între cele două microneregularități care-și întrerup contactul poate fi urmărită în figura (5.14).

În figură este reprezentată schema echivalentă a circuitului electric de alimentare a spațiului de lucru: generator de curent continuu de tensiune U_0 care debitează peste o rezistență R_s și o inductanță L_s asupra microneregularităților între care se amorsează arcul electric. În general, în cursul ruperii

contactului între microneregularitățile O.P. și O.T., rezistența de contact R_a variază după o lege invers proporțională cu suprafața de contact dintre cele două microneregularități.

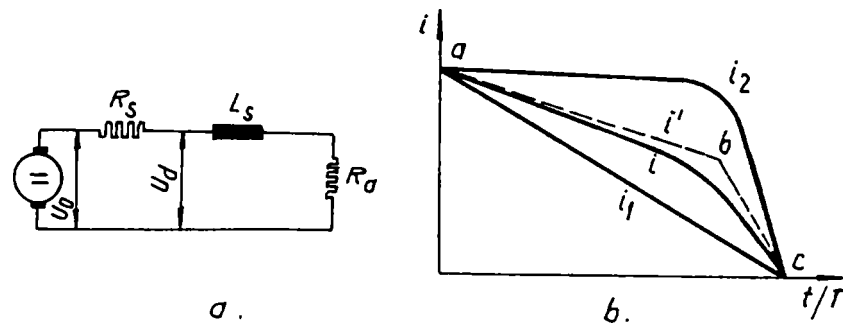


Fig.5.14. Amorsarea arcului electric.

a - schema electrică echivalentă; b - variația curentului la deschiderea contactului.

În aceste condiții, [17], rezistența R_a poate fi exprimată cu relația (5.51):

$$R_a = \frac{R_{a0} \cdot T}{T - t} \quad (5.51)$$

- în care T - este durata de deschidere totală a contactelor; t - timpul curent; R_{a0} - rezistența de contact minimă (la $t = 0$).

Ecuția tensiunilor electromotoare în circuit este (5.52):

$$u_0 = L_s \frac{di}{dt} + R_s i + R_a i \quad (5.52)$$

iar tensiunea pe contacte (5.53):

$$U_a = R_a i = \frac{R_{a0} T}{T - t} i \quad (5.53)$$

Dacă T este suficient de mare, tensiunea electromotoare indusă în inductanța L_s este neglijabilă și deci curentul i_1 scade liniar de la valoarea maximă la zero. Dacă însă T este foarte mic și $R_{a0} \ll$ decât R_s , cât timp $R_a \ll R_s$ curentul nu se schimbă mult în circuit, pentru că inductanța L_s se opune scăderii curentului, iar rezistența echivalentă este constantă. Spre sfârșitul intervalului T , R_a depășește

pe R_s și tinde spre infinit; de aceea curentul i_2 tinde spre zero. Ca urmare, curentul prin circuit va varia conform curbei i_2 din figura (5.14). Curbele i_1 și i_2 sunt curbe extreme, în toate cazurile curba $i = f(t/T)$ se va afla undeva între cele două curbe limită.

Înlocuind curba reală i cu curba aproximativă i' , pe porțiunea bc a acestei curbe se poate scrie (5.54):

$$T \frac{di}{dt} = - \frac{i}{1 - \frac{t}{T}} \quad (5.54)$$

Ținând cont de relațiile (5.52) și (5.54) și neglijând pe R_s față de $u_a = R_a i$, relația (5.53) devine (5.55):

$$u_a = \frac{u_o}{1 - \frac{L_s}{R_{ao} T}} \quad (5.55)$$

Din relația (5.55) rezultă că tensiunea între contactele care se deschid depășește todeauna tensiunea sursei, dacă $L_s = 0$. Pentru cazul $T = L_s/R_{ao}$, u_a ia o valoare infinită. În realitate u_a capătă valori suficient de mari iar câmpul electric în zona catodică poate să depășească o valoare critică și arcul să se amorseze.

5.3.1. Localizarea spațială a descărcărilor prin arc electric nestaționar.

După cum s-a arătat amorsarea arcului electric este o consecință a încălzirii locale mari prin efect Joule-Lenz. Acest mecanism de încălzire care conduce la topirea și vaporizarea unor microvolume din materialul obiectului prelucrării, respectiv obiectului de transfer se poate desfășura simultan în mai multe puncte (fig.5.7) ceea ce conduce la presupunerea că în spațiul de lucru se vor putea dezvolta simultan mai multe arcuri electrice. Numărul acestora este dificil de determinat real,

datorită dinamicii procesului, respectiv a spațiului și a timpului mic în care se desfășoară procesul. Admiterea supoziției de identitate între numărul punctelor de contact și a numărului de arcuri electrice nestaționare poate conduce la identificarea numărului de arcuri electrice care se dezvoltă simultan.

În [14] se propune o metodă de estimare analitică - experimentală cu ajutorul căreia devine posibilă aprecierea cantitativă a numărului de puncte de contact și a arcurilor electrice existente simultan.

Cunoașterea acestui număr este importantă în vederea calculului real al efectelor încălzirii prin efect Joule-Lenz și prin arc electric nestaționar.

Aplicarea, în aceste condiții, a legii lui Kirchhoff (5.56):

$$\sum I = 0 \quad (5.56)$$

conduce la concluzia că pentru evaluarea corectă a efectelor termice, curentul total care se aplică spațiului de lucru se repartizează tuturor spațiilor de lucru elementare. Prin admiterea unei repartiții uniforme a curentului pe cele "n" spații elementare (admiterea unor condiții identice de desfășurare a fenomenelor) rezultă că valoarea intensității curentului (i) care alimentează un spațiu de lucru elementar este (5.57):

$$i = \frac{I}{n} \quad (5.57)$$

Urmare a efectelor termice ale dezvoltării de energie prin efect Joule-Lenz și prin arc electric nestaționar, pe suprafața obiectului prelucrării (sau O.T.) se formează cratere de formă aproximativ semisferică a căror diametru și adâncime depinde și energia descărcării, materialul electrozilor, polaritate, mediul de lucru, etc. Materialul adus în stare topită (vapori) este parțial expulzat din carter, o anumită parte a lui resolidificându-se, în special pe marginile craterului. Se formează astfel noi proeminențe care conduc la formarea unor noi punți de contact electric.

Dacă se admite că topirea (vaporizarea) a avut loc inițial în punctul A (fig.5.15), undeva pe marginea craterului format apare o proeminență maximă B. Dacă această proeminență ajunge în contact cu o proeminență a obiectului conjugat se dezvoltă căldură prin efect Joule-Lenz și prin arc electric

nestaționar, conducând la formarea unui nou crater și a unor noi proeminente (de ex: C și D) unde se vor putea amorsa viitoarele surse termice ș.a.m.d.

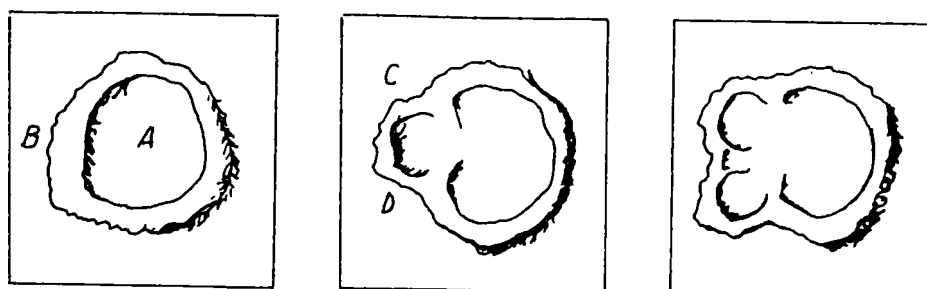


Fig.5.15. Formarea succesivă a craterelor.

În acest mod, devine posibilă acoperirea întregii suprafețe în interacțiune iar datorită mișcării de avans și a presiunii de contact la suprafața obiectului prelucrării se îndepărtează succesiv straturi de material, până la îndepărtarea întregului surplus.

Din cele prezentate rezultă că este imposibilă localizarea spațială exactă a unui spațiu de lucru elementar, dar în ansamblu procesul capătă un caracter de selectivitate, acoperind întreaga suprafață în interacțiune dintre O.P. și O.T.

5.3.2. Localizarea temporară a descărcărilor în arc electric nestaționar.

Pornind de la contradicția în afirmațiile normelor germane, [132], [134], [135], care afirmă că arcul electric are caracter staționar și cele din literatura de specialitate din România, care consideră arcul electric limitat la nivel nestaționar, se consideră oportună o analiză cu privire la localizarea temporară a arcului electric.

Dacă se acceptă stadiile de existență ale descărcări electrice amorsate prin străpungerea unui mediu (fig.5.16), [56], [57], pentru descărcarea electrică amorsată prin ruperea unor contacte electrice

și prin analiza comparativă cu evoluția descărcării la arcul electric pentru sudare, (fig.5.17), [115], devine posibilă încadrarea temporară a descărcării electrice specifice prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact.

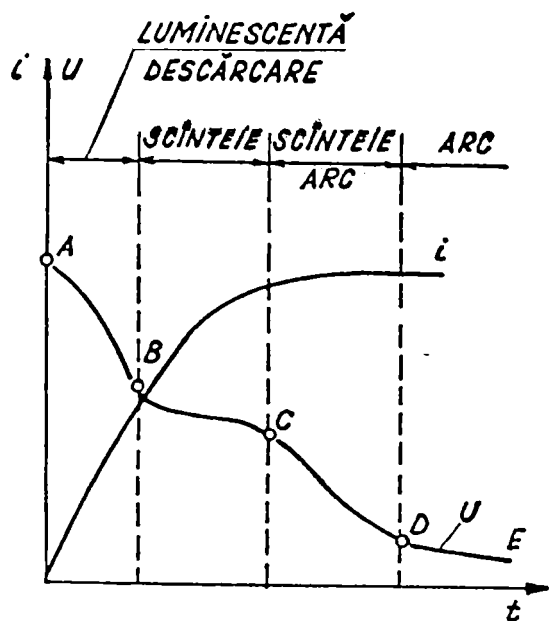


Fig.5.16. Stadii ale descărcării electrice.

În cazul descărcărilor amorțate prin străpungere la o tensiune și o putere suficientă a sursei, între electrozi apare o descărcare electrică care trece printr-o serie de stadii succesive: descărcare luminiscentă, scânteie, scânteie arc și arc.

Primul stadiu îl constituie apariția descărcării luminiscente la intensități ale câmpului electric superioare rigidității dielectrice a mediului. Descărcarea luminiscentă se caracterizează printr-o cădere mare de tensiune între electrozi (de ordinul 10^2 V), curent mic și durată foarte scurtă ($10^{-8} \dots 10^{-7}$ s - fig. 5.16, A-B). Măcar stadiul amorțirii descărcării constă din distrugerea în salturi a rigidității dielectricului dintre diferitele particule conducătoare pe

care dielectricul le conține, în final întreaga punte devenind conductoare.

Curentul trecând prin puncte îi micșorează rezistența, ceea ce conduce la creșterea valorii acestuia. La un moment dat, puntea explodează și rămâne un canal filiform, ionizat, bun conducător de electricitate, care permite trecerea unui curent puternic. În acest stadiu are loc încălzirea, ionizarea puternică și creșterea diametrului canalului descărcării. Acest stadiu tranzitoriu, nestabil al descărcării este numit descărcare în scânteie și durează cca. 10^{-6} s, fiind caracterizat printr-o cădere de tensiune de ordinul 10^2 V (fig.5.16, B-C).

În stadiul următor, căderea de tensiune se micșorează la cca. 30...35V (fig.5.16, C-D), stadiul de scânteie prelungit numindu-se descărcare în scânteie - arc. Faza de scânteie - arc ocupă o perioadă de timp de cca. 10^{-4} s, uneori mai mică, în funcție de intensitatea curentului care trece prin canalul descărcării.

Descărcarea în arc nestăționară începe la o cădere de tensiune de cca. 30V, după un timp de $10^{-4} \dots 10^{-5}$ s de la începutul ei. Acest stadiu este caracterizat printr-o stabilizare a mărimii diametrului canalului descărcării și a intensității curentului (fig.5.16, D-E).

Din analiza condițiilor de stabilitate a arcului electric a rezultat o dependență a caracteristicii arcului de lungimea lui.

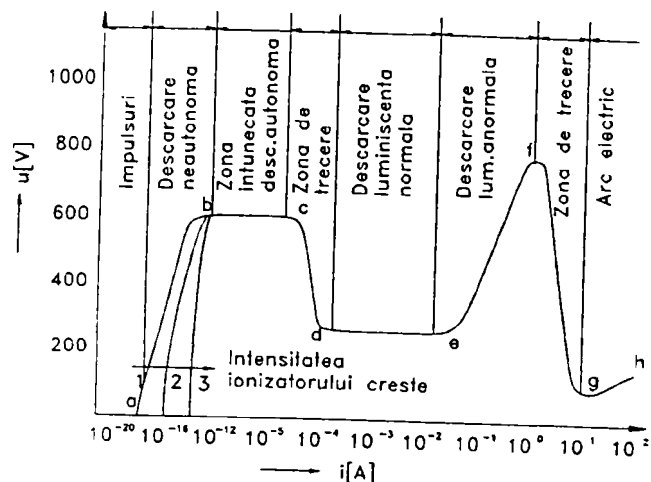


Fig.5.17. Evoluția tensiunii și a curentului la arcul electric pentru sudare.

Pentru determinarea caracteristicii arcului nu există o expresie analitică generală, există numai expresii matematice aproximative.

În [115] se propune expresia lui Seferian, care caracterizează dependența dintre tensiunea arcului (U_a), intensitatea curentului de descărcare (I_d) și lungimea arcului electric (l_a) cu ajutorul unor coeficienți (5.58):

$$U_a = a + c \frac{l_a}{I_d} \quad (5.58)$$

Valorile coeficienților s-au determinat experimental, rezultând pentru electrozi din oțel $a=11V$ și $c=5500VA/cm$. Expriarea grafică a formulei lui Seferian se prezintă în figura 5.18.

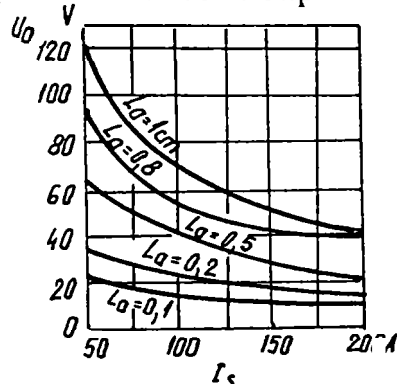


Fig.5.18. Caracteristici ale arcului electric în cazul sudării cu electrozi de oțel.

Prin considerarea parametrilor externi pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact ($U_a < 25V$ și curent de ordinul sutelor de A), din figura 5.18 se poate conchide că lungimea arcului electric care se formează la ruperea contactelor este de maximum 1mm.

Admiterea acestei valori ca limită superioară și considerând viteze relative specifice acestui procedeu de prelucrare (20m/s, 30m/s, 40m/s) pentru timpul de existență a arcului electric rezultă valorile 0,00005s, 0,000033s și 0,000025s, adică valori de ordinul $10^{-4}s$.

Comparând aceste valori cu stadiile descărcărilor electrice (fig.5.16), rezultă că localizarea temporară a descărcărilor electrice specifice prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact se plasează în domeniul descărcărilor electrice în arc nestaționar.

5.3. Îndepărtarea de material prin descărcări electrice amorsate prin străpungerea mediului de lucru.

Prelevarea de material prin străpungere are loc între două microneregularități care sunt foarte apropiate, la un moment dat, dar care nu se ating.

Mecanismul fizic care determină această formă de descărcare electrică a fost prezentat cu suficiente detalii în [30], [32], [56], [57], [51], [92], [11], [46], [47].s.a.

În vederea determinării valorilor limită ale distanței dintre microneregularități, care să permită amorsarea descărcărilor prin străpungere se poate porni de la identificarea câmpului electric necesar pentru amorsarea descărcărilor admis la prelucrarea prin eroziune electrică cu descărcări amorsate prin străpungere.

În [30], [46], [45], se admit interstiții erozive în intervalul 0,01...0,5mm. Corelând aceste valori cu tensiunile de mers în gol U_0 uzuale pentru generatoarele de impulsuri (cca.100V) rezultă prin aplicarea relației de determinare a câmpului electric că, valorile câmpului electric care permit

$$E = \frac{U_0}{\delta} \quad (5.59)$$

amorsarea descărcărilor electrice prin străpungerea mediului de lucru sunt cuprinse între 200...10.000V/m. (5.59):

(δ - dimensiunea interstițiului [mm])

În aceste condiții, admițând tensiunea de alimentare a spațiului de lucru la prelucrarea prin E.E.R.C., de 20V rezultă că distanța limită dintre două microneregularități între care poate avea loc amorsarea descărcărilor electrice prin străpungere este cuprinsă între 0,002mm și 0,1 mm.

Dacă două microneregularități, una aparținând obiectului prelucrării și cealaltă obiectului de transfer se află la distanțe în domeniul dimensional determinat anterior, sunt create condițiile de străpungere a rezistenței electrice a mediului de lucru și se formează microcanale de descărcare electrică caracterizate prin dezvoltarea de energie într-un interval limitat de spațiu și timp.

Durata foarte mică a descărcării, determinată de viteza relativă dintre O.P. și O.T. are ca urmare caracterul de impuls al descărcării, caracterizat prin densități de putere mari care se transmit obiectului

de prelucrat, celui de transfer și mediului de lucru, generând transformări fizice și chimice la suprafața acestora.

Trebuie totuși menționat faptul că din punct de vedere a efectelor termice aceste descărcări sunt inferioare celor care conduc la topiri și vaporizări prin efect Joule-Lenz și prin arc electric nestaționar. Din acest motiv, ponderea lor la îndepărtarea de material în cazul prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact este mică.

5.4. Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de abrazare.

Ca urmare a acțiunilor termice ale surselor de căldură prezentate anterior, pe suprafețele active ale celor două obiecte în interacțiune (O.P. și O.T.) se formează o structură microgometrică particulară, fiind caracterizată prin existența unor microproeminențe, unde se poate presupune că se află o cantitate, proporțional însemnată, de material resolidificat. Aceste microproeminențe, cu duritate mai mare decât duritatea materialului de bază, capătă, sub acțiunea fenomenelor complexe care se desfășoară în spațiul de lucru, forme neregulate, cu existența posibilă a unor vârfuri și muchii cu orientări și forme stocastice. În aceste condiții, obiectul de transfer poate fi asemănat cu sculele utilizate la operațiile de rectificare.

Pe de altă parte, în spațiul de lucru există o cantitate însemnată de produse ale eroziunii, îndepărtate preponderent de pe suprafața O.P. și care au diferite forme. În se analizează forma produselor eroziunii, constatându-se în majoritate forme sferice, de diferite dimensiuni, forme rezultate în urma răcirii rapide, în apă, a microvolumelor de material topit de acțiunea surselor termice. S-a constatat însă și existența unor produse ale eroziunii de forme neregulate, cu muchii ascuțite, provenite fie prin resolidificarea, în condiții particulare ale topiturii de metal, fie prin îndepărtarea pe cale mecanică a unui surplus de material.

Ținând cont de cele prezentate mai sus se pot distinge două mecanisme principale de îndepărtare de material prin abrazare:

- abrazare tip rectificare;
- abrazare tip lepuire.

5.4.1 Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de abrazare-tip rectificare.

La această variantă de îndepărtarea mecanică de material obiectul de transfer poate fi asemănat cu o sculă multicuțit, având tășuri geometrice nedefinite (fig.5.19). Aceste tășuri aparțin microproeminențelor dure formate pe suprafața activă a obiectului de transfer.

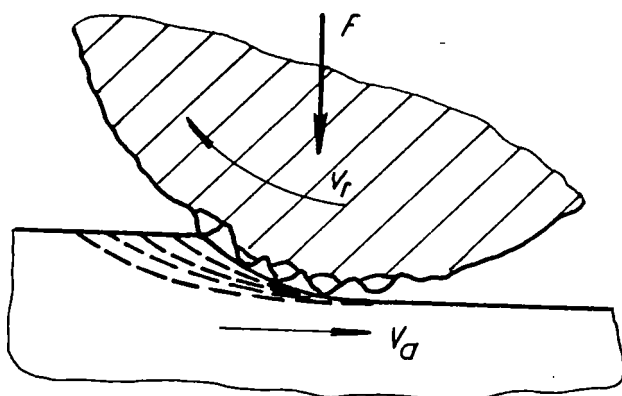


Fig.5.19. Schema îndepărtării de material prin acțiunea mecanică de abrazare-tip rectificare.

Datorită faptului că microproeminențele pot fi echivalate cu scule care au unghiuri de degajare negative și a faptului că viteza de așchiere este mare iar așchiile rezultate au dimensiuni mici, apar pronunțate fenomene termice și de frecare. [28], [96].

Așchia formată la îndepărtarea de material prin acest mecanism va avea un unghi de îngroșare β foarte mic (de ordinul minutelor), datorită adâncimii mici de prelucrare (fig.5.20). Din această cauză în cursul formării ei, așchia va avea trei zone distincte.

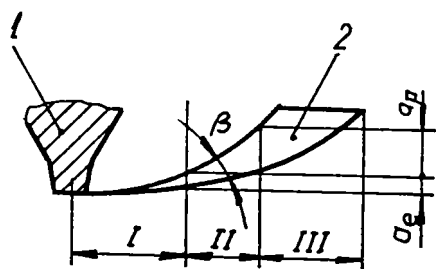


Fig.5.20. Formarea așchiei la îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de abrazare-tip rectificare.
1 - microproeminență;
2 - așchie.

În prima zonă (I) microproeminența va aluneca pe suprafață, fără să așchieze, provocând o deformare elastică a materialului. Prin această alunecare crește temperatura și stratul se durifică. Lungimea zonei depinde, în primul rând, de unghiul de îngroșare β - cu cât acesta este mai mic, lungimea de alunecare va fi mai mare. În zona II are loc o deformare plastică, iar în zona III așchiere propriuzisă. Grosimile critice a_e și a_p - corespunzătoare zonei de deformare elastică și a_p - corespunzătoare capătului zonei de deformare plastică sunt constante ale materialului din care este confecționat obiectul prelucrării.

În realitate partea activă a obiectului de transfer are o configurație stocastică, tășurile fiind orientate întâmplător și fiind situate la adâncimi diferite față de o suprafață de referință. Pe de altă parte geometria tășurilor se modifică în timp, sub acțiunea multitudinii de fenomene care se desfășoară în spațiul de lucru. Prin

existența microsurselor termice, care la rândul lor au o repartiție stocastică în spațiul de lucru, se poate considera că fenomenul de abrazare - tip rectificare se desfășoară la temperaturi mai mari decât cele ale mediului ambiant cu efecte favorabile asupra cantității de material îndepărtate.

5.4.2 Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de abrazare - tip lepuire.

Existența produselor eroziunii în spațiul de lucru "transportate" datorită vitezei relative între obiectul prelucrării și obiectul de transfer determină, și ele, un mecanism de abrazare. Faptul că produsele eroziunii pot avea și forme geometrice nedefinite, cu muchii așchietoare conduce la presupunerea că ele pot avea acțiuni de natură abrazivă asupra obiectului prelucrării.

Mecanismul intim de îndepărtare de material este asemănător cu cel prezentat anterior, cu observația că particulele așchietoare sunt în faza inițială libere, dar în fazele de prelucrare propriuzise pot fi înglobate în materialul celor două obiecte în interacțiune, datorită încălzirii locale a acestora acționând ca o microproeminență.

Datorită faptului că materialul obiectului de transfer este de calitate inferioară în comparație cu cel al obiectului prelucrării, în esență mai "moale", se poate presupune că înglobarea produselor eroziunii în acest obiect este mai pronunțată decât înglobarea produselor eroziunii în O.P.. Acest lucru determină, pe de o parte o acțiune abrazivă - tip lepuire mai pronunțată asupra obiectului prelucrării, iar pe de altă parte, o protecție a obiectului de transfer prin "durificare" continuă a suprafeței sale active.

Cum procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact se desfășoară într-un mediu de lucru cu caracter oxidant - apa, pe suprafața obiectului prelucrării se formează pelicule superficiale de oxizi, cu aderență redusă la masa O.P. și care pot fi înlăturate ușor pe cale mecanică.

5.5. Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de adeziune.

În timpul procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact materialul adus în stare topită de sursele termice este expulzat din crateră și ajunge în spațiul de lucru unde se va solidifica. Cum însă spațiul de lucru, la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact, este

caracterizat prin zone de contact mecanic nemijlocit și zone interstițiale, topitura de material are posibilitatea de a ajunge, fie în mediul de lucru - apa - când se va solidifica luând forme preponderent sferice, fie pe suprafața unuia din cele două obiecte în interacțiune.

La atingerea acestor suprafețe "reci" se formează "microsuduri" ale particulei cu materialul de bază. În general, nu se poate vorbi de o sudare metalurgică astfel că microjoncțiunea acestor particule cu masa obiectului prelucrării (sau OT) este relativă. Faptul că solidificarea particulei se face, într-o parte rapidă, fiind în contact cu mediul de lucru - apa și în partea opusă mai lent datorită contactului cu masa obiectului prelucrării (sau OT), forma solidificată a particulei poate fi cea din figura 5.21.

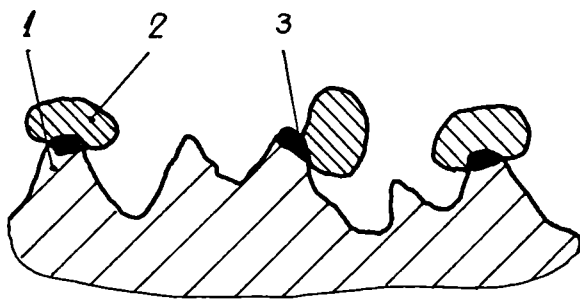


Fig.5.21. Microjoncțiunea particulelor cu obiectul prelucrării (OT)

- 1 - obiectul de prelucrat (OT);
- 2 - particulă solidificată;
- 3 - microsudură.

În momentul în care microasperități ale obiectului conjugat ating aceste particule de pe suprafața metalică, joncțiunea relativă cedează și particula devine liberă. Fenomenul este ușurat de dezvoltarea de căldură prin efect Joule-Lenz, care slăbește joncțiunea și așa labilă.

Cum la prelucrarea prin EERC, de regulă, obiectul prelucrării este static și mișcarea relativă cu viteză mare o asigură obiectul de transfer, probabilitatea de aderare a particulelor la suprafața primului obiect este mai mare.

5.6. Îndepărtarea de material prin acțiunea mecanică de forfecare.

Acest mecanism de îndepărtare de material este determinat de faptul că în zona de contact a obiectului prelucrării cu obiectul de transfer există posibilitatea ca microasperități aparținând celor două obiecte să se afle într-o situație conform figurii 5.22.

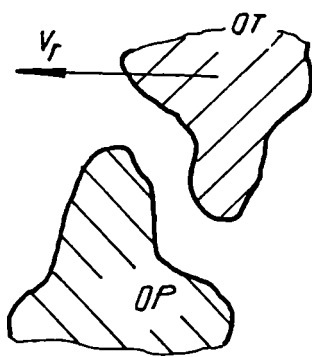


Fig.5.22. Forfecarea microasperităților.

Considerând τ_{OP} - efortul admisibil la forfecare al obiectului prelucrat și τ_{OT} - efortul admisibil la forfecare al obiectului de transfer se pot distinge două situații:

- dacă $\tau_{OP} < \tau_{OT}$ - ruperea va avea loc în corpul obiectului prelucrării și efectul este favorabil conducând la creșterea cantității de material îndepărtat;
- dacă $\tau_{OP} > \tau_{OT}$ - ruperea va avea loc în corpul obiectului de transfer conducând la uzura acestuia.

Datorită acțiunii termice prin efect Joule-Lenz mecanismul ruperii este favorizat. Există însă și posibilitatea ca odată cu ruperea să se producă și o "microsudură" a microasperității rupte cu cea rămasă la suprafața unui obiect. Aceasta va fi îndepărtată, la rândul ei, prin acțiunea mecanică de adeziune.

Îndepărtarea de material pe cale mecanică a putut fi evidențiată prin analize vizuale ale suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică cu rupere de contact cât și prin determinări ale rugozității suprafețelor prelucrate.

Au fost analizate suprafețe plane prelucrate prin EERC constatându-se zone cu aspect și rugozitate diferite. Unele zone prezintă aspect lucios cu microgeometrie caracteristică așchierii (direcții de așchiere) iar altele, microgeometrie caracteristică erodării (anizotropie microgeometrică).

Zonele sunt localizate pe suprafața prelucrată în dependență de direcția și sensul mișcării relative.

5.7. Parametrii procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Curentul electric. Este unul dintre parametrii de bază al procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact. De regulă nu se utilizează direct intensitatea curentului electric ci densitatea de curent $j = I/S$. Acest lucru este determinat de faptul că în timpul procesului de prelucrare suprafața de contact atât cea aparentă cât și cea reală suferă modificări care se reflectă asupra variației intensității curentului electric.

Literatura de specialitate arată că densitatea de curent are următoarele influențe:

- pentru densități mici de curent, cantitatea de energie termică din proces este mică și, implicit rezultă o cantitate mai redusă de material îndepărtat la suprafața obiectului prelucrării. Pe de altă parte, rezultă o scădere a mărimii zonei influențate termic dar, toate acestea pe baza creșterii consumului specific de energie electrică. La aceste valori ale densității de curent, ponderea îndepărtării de material prin acțiuni mecanice este mare în comparație cu cantitatea de material îndepărtată prin acțiuni termice ceea ce conduce la o calitate bună a suprafețelor prelucrate.

- pentru densități mari de curent, acceptate de literatură - $j > 20\text{A/mm}^2$, efectele termice sunt pronunțate atât în timpul contactului cât și ulterior la descărcare în arc electric nestaționar. De această dată crește cantitatea de energie termică, consumul specific tinde spre valori optime dar, calitatea suprafeței și zona influențată termic suferă influențe negative. În acest caz, ponderea îndepărtării de material prin acțiuni mecanice este scăzută. Efectul acestei ponderi scăzute a îndepărtării de material pe cale mecanică este înrăutățirea calității suprafețelor.

Tensiunea pe spațiul de lucru este un parametru care determină stabilitatea proceselor elementare din spațiul de lucru. Analiza cercetărilor evidențiază următoarele domenii de lucru pentru tensiune:

- domeniul tensiunilor mici, 8...12 V, în care interacțiunea obiectului de prelucrat cu cel de transfer se manifestă preponderent prin încălzirea datorită efectului Joule-Lenz și mai puțin prin încălzire datorită arcului electric nestaționar, care la aceste valori ale tensiunii transferă o cantitate redusă de energie;

- domeniul tensiunilor mijlocii 12...22 V, conduce la un echilibru al proceselor termice elementare în acest caz stabilitatea procesului de dezvoltare a energiei de efect este asigurată;

- domeniul tensiunilor mari 22...32 V, în care ponderea descărcărilor în arc electric staționar însoțite de efecte termice pronunțate este ridicată. Temperatura punților de legătură este apropiată sau depășește mult temperatura de topire și chiar cea de vaporizare a materialului obiectului prelucrării ceea ce conduce la efecte termice pronunțate în zona influențată termic și la un consum energetic dezavantajos. În esență, prin valoarea tensiunii de alimentare este influențată preponderent calitatea suprafeței prelucrate.

Cu toate că literatura de specialitate analizează distinct parametrii electrici - intensitatea curentului și tensiunea de alimentare, între aceștia există o interdependență care de multe ori conduce la alegerea unuia sau altuia dintre ei pentru conducerea și dirijarea procesului eroziv.

Forța și presiunea sunt parametri necesari pentru asigurarea contactului mecanic nemijlocit între obiectul de transfer și cel de prelucrat. Din condiții identice cu cele care au condus la luarea în considerare a densității de curent și în acest caz acoperitor este parametrul presiune care în literatura de specialitate este indicat în domeniul $1...10 \text{ N/mm}^2$. Prin variația presiunii de contact este influențată direct mărimea ariei reale de contact, deci este influențată direct și densitatea de curent. Din analiza caracteristicilor surselor de alimentare (recomandate cu caracteristici externe rigide, căzătoare) se constată că forța de apăsare (presiunea) influențează și tensiunea în procesul de prelucrare. Datorită controlului facil al tensiunii, de regulă sistemele de avans automat au ca parametru de comparație tensiunea care, în fond definește presiunea de contact, deci starea spațiului de lucru.

Viteza relativă este și ea un parametru de importanță majoră la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. De regulă viteza relativă este realizată prin viteza periferică a obiectului de transfer. Există și situații în care ambele obiecte în interacțiune realizează mișcări, dar totdeauna viteza obiectului de transfer este mult mai mare decât cea a obiectului de prelucrat. Din acest motiv viteza de mișcare (rotație) a obiectului de prelucrat poate fi neglijată, ea fiind utilă numai pentru generarea unor suprafețe.

Viteza relativă este parametrul care determină și limitează energia de efect și puterea dezvoltată în spațiul de lucru. Prin mărimea ei, ea influențează direct duratele de existență a microsurselor termice.

Vitezele relative mici fac să crească durata de existență a microcontactelor, deci o creștere pronunțată a cantității de căldură dezvoltată prin efect Joule-Lenz. Dar, datorită duratelor relativ mari ale contactului mecanic nemijlocit sunt create condițiile ca o mare parte a cantității de căldură dezvoltate să pătrundă în masa obiectului prelucrării, deci caracterul de impuls să fie diminuat. Pe de altă parte, viteza relativă mică conduce și la creșterea duratei de existență a arcului electric care poate depăși nivelul nestaționar ajungând în domeniul arcului electric staționar cu efecte negative asupra cantității de material îndepărtat și a influențării zonei adiacente prelucrării.

Vitezele relative mari fac ca durata de existență a microcontactelor să scadă, să crească în același timp numărul de punți de legătură formate în unitatea de timp ceea ce conduce la asigurarea caracterului de impuls atât a dezvoltării de căldură prin efect Joule-Lenz cât și prin arc electric nestaționar. Consecințele globale ale acestei viteze relative mari sunt creșterea productivității, îmbunătățirea rugozității și diminuarea rugozităților termice în straturile de suprafață a obiectului prelucrării.

Din analiza literaturii de specialitate, se recomandă ca vitezele relative să fie cuprinse în domeniul 20...50 m/s.

Lichidul de lucru este un parametru activ al procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, în special prin modul de aplicare și debit dar și prin natura sa și compoziție. El influențează direct procesul de prelucrare prin asigurarea dezvoltării mecanismelor elementare într-un spațiu constrâns (în special descărcarea prin arc electric nestaționat) cu influențe benefice asupra densității de putere transmise.

În literatura de specialitate sunt prezentate diverse medii (jeturi de aer comprimat, soluții apoase de caolină, soluții apoase cu săruri de sodiu și potasiu, amestecuri anticorozive) sau doar apă tehnologică. Se pare însă că, utilizarea ca mediu de lucru a apei tehnologice oferă procesului de prelucrare prin eroziune electrică calități corespunzătoare și din acest motiv, privit prin aspect economic, nu este eficientă utilizarea altor medii.

De importanță mare însă, este modul de aplicare (introducere) a mediului în spațiul de lucru. Cum vitezele relative între cele două obiecte sunt mari și, de multe ori suprafața aparentă de contact este de asemenea mare este necesară o direcționare destul de precisă a jetului de apă (jeturilor de apă) în așa fel încât ea să ajungă să fie activă în întregul spațiu eroziv.

5.8. Factorii procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Caracteristica circuitului electric de alimentare a spațiului de lucru este determinată, în special de mecanismul de descărcare și transfer energetic prin arc electric nestaționat. Prin acest factor este direct influențată stabilitatea arcului electric. Cercetările efectuate asupra surselor de alimentare au evidențiat necesitatea unor caracteristici rigide și coborâtoare a lor și în același timp influențele favorabile a unor structuri inductive.

Perechea de materiale O.T.–O.P. este un factor important în caracterizarea prelucrabilității materialelor metalice. Din cercetările efectuate s-a putut concluziona că pentru confecționarea obiectului de transfer este posibilă utilizarea oricărui material metalic cu bune proprietăți de electroconductibilitate. Sunt evidențiate următoarele materiale din care se pot confecționa obiectele de transfer:

- oțeluri
 - de uz general (OL)
 - carbon de calitate (OLC)
 - aliate pentru construcția de mașini
 - carbon pentru scule (OSC)
 - aliate pentru scule
 - rapide pentru scule (Rp)
- fonte
 - nealiate
 - aliate
- materiale neferoase
 - aluminiu tehnic (Al)
 - cupru (Cu)
 - aliaje cupru-zinc
 - aliaje cupru-staniu

Ținând cont că diferențele asupra productivității la utilizarea diferitelor materiale prezentate mai sus, sunt relativ mici, hotărâtoare devine analiza economică care evidențiază situația favorabilă la utilizarea oțelului OL 37 (OL 42). [10].

Reglarea automată a spațiului de lucru tehnologic este un factor care contribuie într-o măsură hotărâtoare la desfășurarea stabilă a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, constituindu-se astfel într-un mijloc de dirijare și optimizare a procesului. Prin reglajul automat al interstițiului tehnologic se poate realiza corelarea parametrilor electrici și mecanici astfel încât să se realizeze o prelucrare continuă și stabilă. Datorită modului în care este constituit spațiul de lucru cu contacte mecanice nemijlocite la nivelul microasperităților O.P. și O.T. reglarea automată a spațiului de lucru în cazul prelucrării prin E.E.R.C. este simplificată, prin faptul că nu sunt necesare mișcări de retragere automată a obiectului de transfer în raport cu cel de prelucrat. În cazul în care presiunea de lucru depășește anumite limite, limite care determină un proces stabil, nu se impune retragerea obiectului de transfer ci doar oprirea avansului. Procesul de prelucrare, care se poate desfășura în continuare conduce la îndepărtarea de material și spațiul de lucru se reglează și revine la starea de stabilitate.

În ansamblu se poate considera că procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact este guvernat de un ansamblu format din trei vectori (fig.5.23). [108].

Se poate constata că în afara vectorilor mărimilor de intrare și a celor de ieșire asupra procesului eroziv din spațiul de lucru acționează și o serie de mărimi perturbatoare atât de natură mecanică cât și de natură electrică.

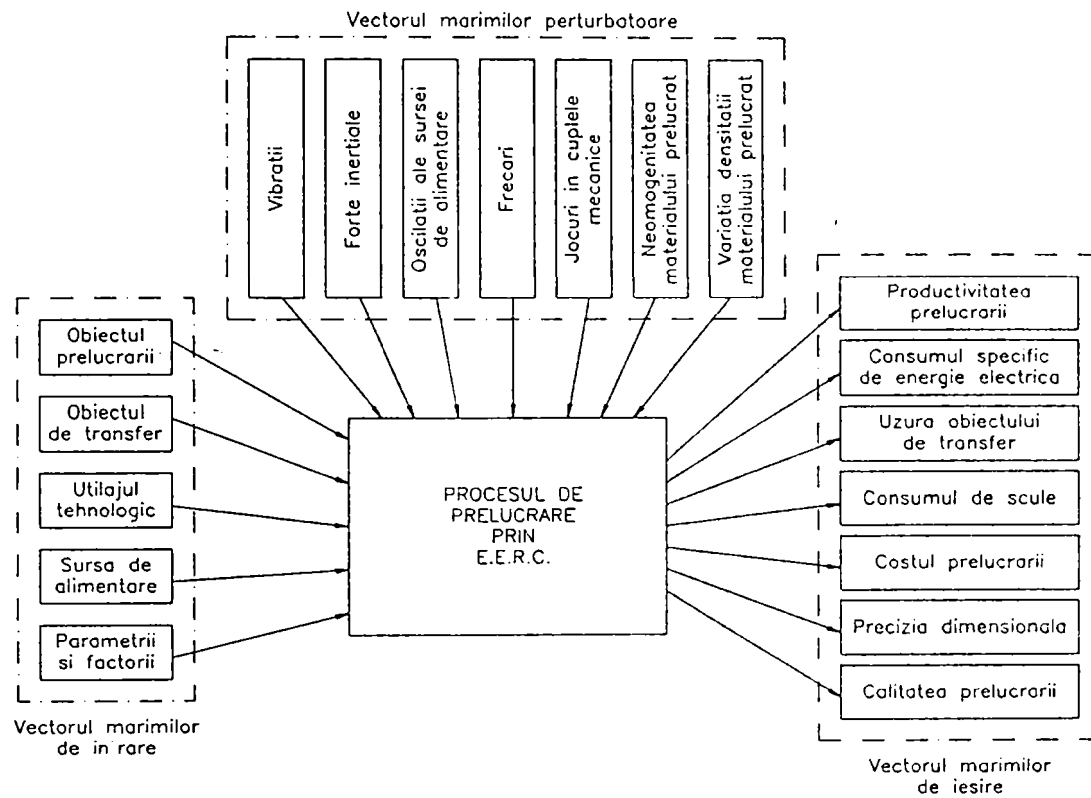


Fig.5.23. Variabilele specifice procesului de prelucrare prin E.E.R.C.

5.9. Modele care descriu global procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Literatura de specialitate prezintă diferite încercări de modelare a procesului de prelucrare prin E.E.R.C. având la bază atât cercetări experimentale cât și cercetări teoretice. Între aceste modele există diferențe destul de mari, mai ales în cazul celor determinate pe cale experimentală, deoarece condițiile de experimentare care au condus la diferitele expresii analitice nu au coincis.

5.9.1. Modele experimentale ale procesului de prelucrare prin E.E.R.C.

Lucrarea, [5], stabilește modele experimentale pentru productivitate și rugozitate la prelucrarea suprafețelor cilindrice pe strunguri adaptate. Modelele sunt de forma (5.60):

$$CT = C_1 \cdot U^{C_2} \cdot S_l^{C_3} \cdot S_t^{C_4} \cdot V^{C_5} \quad (5.60)$$

- în care CT este productivitatea sau rugozitatea; U - tensiunea [V]; S_l - avansul longitudinal [mm/s]; S_t avansul transversal [mm/s]; V - viteza de rotire a O.P. [m/min]; C₀, C₁, C₂, C₃, C₄ și C₅ sunt coeficienți stabiliți efectiv pentru prelucrarea oțelurilor pe bază de Ni și Cr și utilizând ca obiect de transfer aluminiul și fonta.

În [26] este prezentată un model, care are la bază o metodă a experimentului factorial ortogonal, pentru debitarea prin E.E.R.C. a unor probe din Cr18Ni8Mn6x. Au fost stabilite 18 modele distincte, 9 pentru productivitate și 9 pentru consumul specific de energie. Modelele sunt polinomiale și au forma generală (5.61):

$$CT = C_0 + C_1x_1 + C_2x_2 + C_3x_1x_2 + C_4x_1^2 + C_5x_2^2 \quad (5.61)$$

în care: CT este productivitatea sau consumul specific de energie; x₁ - valoarea codificată (-1 sau 1) a forței de apăsare; x₂ - valoarea codificată (-1 sau 1) a vitezei relative între O.T. și O.P.; C₀, C₁, C₂, C₃, C₄ și C₅ sunt coeficienți cu valori particulare determinate din condițiile de experimentare.

Sesizând limitele pe care experimentul factorial ortogonal îl prezintă în [108] este dezvoltat un model exponențial. Sunt determinate trei relații pentru productivitate și trei pentru consumul specific de energie și au forma (5.62):

$$Q_p = e^{-2,213} \cdot F^{1,217} \cdot U^{-0,016} \cdot I^{0,168} \quad (5.62)$$

5.9.2. Modele teoretice ale prelucrării prin E.E.R.C.

Stabilirea acestor modele au avut la bază cele două surse termice, efectul Joule-Lenz și arcul electric nestaționar și rolul lor hotărâtor la îndepărtarea de material la suprafața obiectului prelucrării.

În [108] se prezintă relația (5.63) pentru evaluarea cantității de căldură dezvoltată în zona contactului:

$$Q_{med} = A_m A_g \frac{U_c^2 \cdot F^{0.6}}{v_r} \quad (5.63)$$

unde A_m este o constantă de material; A_g - o constantă depinzând de condițiile de prelucrare (razele O.T. și O.P. și adâncime de prelucrat U_c - tensiunea pe spațiul de lucru; F - forța de apăsare și v_r - viteza relativă între O.P. și O.T.

Considerând că atât efectul Joule-Lenz cât și arcul electric își aduc fiecare propriul aport la masa totală îndepărtată prin E.E.R.C. [66] în se propune relația (5.64):

$$\Delta m = (1 + \mu) \cdot \Delta m_1 \quad (5.64)$$

în care: Δm_1 este cantitatea de material încălzită și topită prin efect Joule-Lenz; $\mu = \Delta m_2 / \Delta m_1$ - Δm_2 - masa topită prin arc electric nestaționar.

Utilizând această relație și expresia căldurii dezvoltată prin efect Joule-Lenz sub formă calorică și cu parametrii electrici s-a putut determina raportul maselor îndepărtate prin efect Joule-Lenz și prin arc electric nestaționar (5.65):

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = K \cdot \frac{F^{0.2}}{I_t \cdot \sqrt{v} \cdot \sqrt{U - a}} \quad (5.65)$$

În literatură sunt prezentate și modele teoretice care determină direct parametri tehnologici (5.66): [66],

$$P = (0,5 \dots 1,2) \cdot \frac{1 + \mu_m}{a \cdot \rho \cdot \sqrt{\pi \cdot \xi}} \cdot \frac{U \cdot I}{c \cdot \Delta\theta + \lambda_t} \cdot \frac{F^{0,6}}{H^{0,185}} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right] \quad (5.66)$$

Toate aceste modele nu pot fi considerate cu valabilitate generală, pe de o parte deoarece sunt determinate în condițiile particulare ale unor microsurse de temperatură singulare fie că, nu au încă o verificare experimentală suficientă.

6. UTILAJE DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU RUPERE DE CONTACT ȘI ECHIPAMENTE DE CERCETARE

6.1. Principii constructive ale utilajelor de prelucrare prin E.E.R.C..

6.1.1. Elemente determinante la conceperea utilajelor de prelucrare prin E.E.R.C..

Prelucrarea prin EERC, prin cinematica sa proprie și prin faptul că ea se materializează prin îndepărtări de material în straturi succesive conduce la necesitatea existenței posibilităților de mișcare controlată – rotativă sau liniară – pentru asigurarea localizării temporare a microcontactelor și rectilinie pentru menținerea constantă a spațiului de lucru. Această cinematică impusă conduce la asimilarea posibilă a acestora cu grupa utilajelor de prelucrare prin așchiere.

Cu toate acestea, este de menționat faptul că datorită sensibilității reduse a procesului global la variația parametrilor regimului de prelucrare sistemul tehnologic poate fi mai simplu și conducerea

procesului mai ușoară. Pentru ștandurile experimentale însă această posibilă "simplificare" nu poate fi acceptată deoarece acestea au ca destinație principală identificarea "exactă" a tehnologiilor de prelucrare.

În contextul acceptării cerințelor puse utilajelor de prelucrare prin EERC (și a ștandurilor experimentale) identice cu cele puse mașinilor unelte pentru prelucrarea prin așchiere se pot accepta și principalele etape impuse proiectării unui astfel de utilaj.

Elementele determinante în conceperea și proiectarea utilajelor de prelucrare sunt determinate în principal de condițiile de exploatare ale lor. În acest sens se disting două mari aspecte care definesc "complexitatea" viitorului utilaj (fig.6.1).

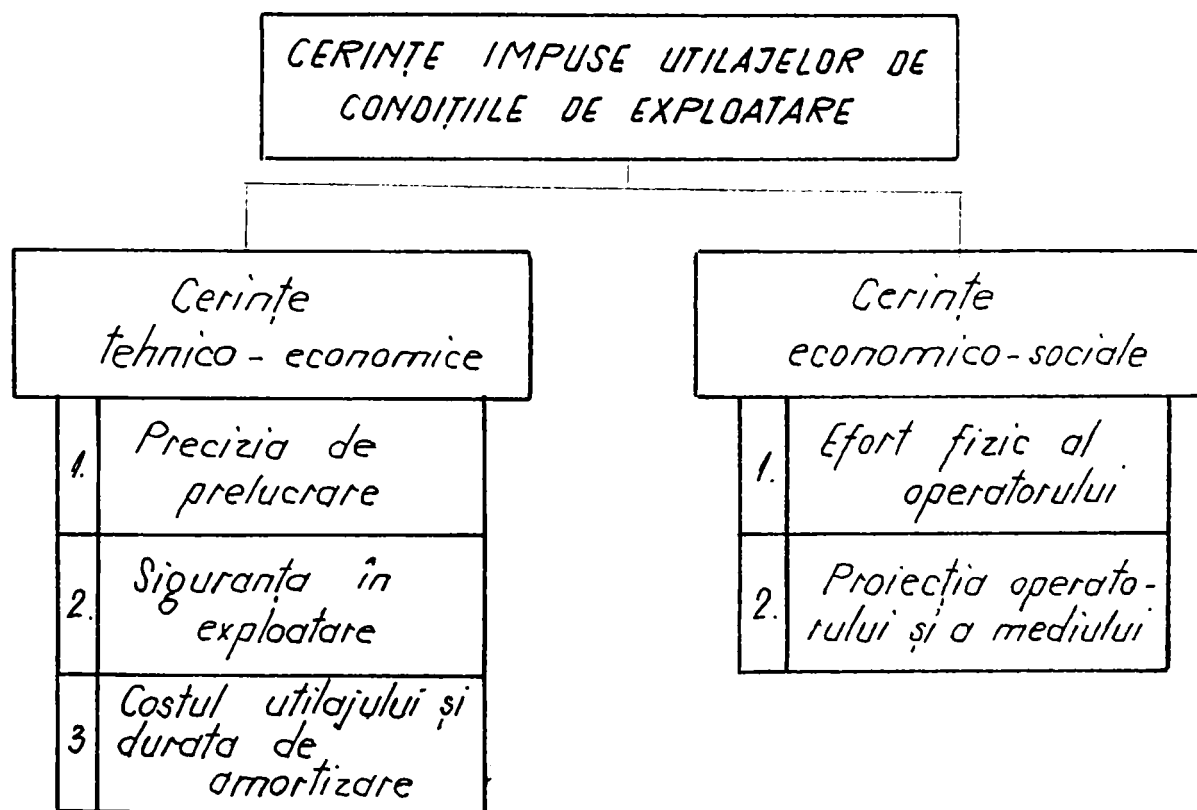


Fig.6.1.
Aspecte determinante pentru conceperea utilajelor de prelucrare.

Primul aspect - cel tehnico-economic - impune realizarea de către utilajele de prelucrare a unei productivități impuse asigurând totodată o precizie de prelucrare corespunzătoare cu cea pretinsă și încadrarea calității suprafețelor prelucrate în anumite limite. Totodată, utilajul trebuie astfel conceput încât intervențiile pentru reparații să fie cât mai rare (efectuate numai la intervale mari de timp), iar durata lor să fie minimă.

Tot în cadrul acestui aspect tehnico-economic se încadrează și cerința ca proiectul utilajului să fie realizat la nivel tehnic corespunzător situației actuale, dar să se țină cont și de evoluțiile ulterioare, totul la un preț de cost cât mai redus.

Al doilea aspect cel referitor la precizia de prelucrare a unui utilaj se referă la posibilitatea determinării ei funcție de precizia pieselor executate pe acesta prin evaluarea preciziei de formă, preciziei dimensionale și a calității suprafeței prelucrate. Însă, o asemenea apreciere globală nu poate furniza indicații cu privire la influența diferitelor componente ale preciziei utilajului. De aceea se impune cunoașterea surselor individuale de erori. Este de subliniat faptul că în procesul de exploatare, precizia de prelucrare variază în concordanță cu uzura pieselor și cu acumularea deformărilor remanente la unele ansambluri componente.

Astfel, la definirea preciziei de prelucrare a unui utilaj se impune analizarea separată a influenței asupra acesteia a preciziei geometrice, statice, cinematice și dinamice.

În cazul utilajelor de prelucrare cu energii concentrate (tehnologii neconvenționale) s-a impus exprimarea productivității prin cantitatea de material (volum) îndepărtată în unitatea de timp (6.1.):

$$Q = \frac{V}{t} \quad [\text{mm}^3 / \text{min}] \quad (6.1.)$$

Această cantitate de material poate fi exprimată prin straturi succesive, având secțiuni s dependente de forma obiectului de transfer și de nivelul sursei energetice, îndepărtate cu o anumită viteză liniară v_{lin} (6.2.):

$$Q = s \cdot v_{lin} \quad [\text{mm}^2 \cdot \text{mm} / \text{min}] \quad (6.2.)$$

În aceste condiții productivitatea prelucrării este determinată de existența unei arii cât mai mari de interacțiune OT-OP ceea ce este în opoziție față de cerința concentrării energetice a factorilor activi. Cum aspectul concentrării energetice este determinant rezultă că o mărire a productivității pe seama creșterii secțiunii de interacțiune OT-OP peste unele limite proprii procedurii este imposibilă.

A doua posibilitate de creștere a productivității, conform relației (6.2.) este cea de mărire a vitezei liniare, viteză care exprimă, în esență, viteza de "apropiere" a obiectului de transfer față de obiectul supus prelucrării. Creșterea vitezei liniare v_{lin} este însă limitată de condiții energetice și are ca

efect cert o scădere a preciziei de prelucrare și efecte conexe înrăutățite (înrăutățirea calității suprafeței prelucrate, modificări mai pronunțate în ZIT, etc.).

Cum ambele variante care pot conduce la creșterea productivității prelucrării sunt dependente de nivelul energetic al interacțiunii OT-OP, rezultă necesitatea corelării corecte și interdependențe a factorilor din relația (6.2.) și v_{lin} .

Particularizând această constatare la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact procedeu tehnologic primar, unde importanța calității suprafeței prelucrate este mai redusă se poate conchide că măbind ambii factori este posibilă creșterea substanțială a productivității. Cum însă creșterea factorului s conduce la scăderi ale presiunii de lucru p respectiv a densității de curent j sub limite admise de desfășurarea eficientă a procesului eroziv rezultă că, creșterea productivității poate fi eficient realizată prin creșterea factorului v_{lin} , teoretic nelimitat. Aceasta este de altfel și cauza care a condus la aplicarea preponderentă a acestui procedeu de prelucrare la operații de debitare.

Pe de altă parte, în anumite condiții de lucru, poate apare fenomenul vibrațiilor întreținute în special la procedeele sau variantele la care între obiectul prelucrării și cel de transfer sunt necesare și mișcări relative, care au mai multe cauze printre care trebuie menționate: dezechilibre dinamice datorită existenței unor excentricități, crearea excentricităților din motive de conducere incorectă a procesului ș.a. Deoarece aceste cauze sunt influențate în mod direct de către s și v_{lin} rezultă că și probabilitatea de apariție a vibrațiilor întreținute conduce la limitarea factorilor de care depinde productivitatea.

Al doilea aspect care definește "complexitatea" viitorului utilaj - siguranța în exploatare este evaluată prin numărul de defectări sau prin timpul afectat utilajului raportat la o anumită perioadă de timp, iar durabilitatea se apreciază prin timpul total de funcționare a mașinii în limitele de productivitate și de precizie stabilite.

Scoaterea din uz a unui utilaj se face în raport cu uzura fizică a acestuia, dar în unele cazuri și datorită uzurii morale a lui.

În ceea ce privește prețul de cost al utilajului, în condițiile asigurării unui nivel tehnic adecvat prezentului, dar acceptabil și pentru un viitor mai apropiat sau îndepărtat, în funcție de durata de utilizare estimată acesta trebuie să devină un țel urmărit cu preponderență, dar numai în condițiile asigurării tehnologicității necesare. Printre principalele căi de reducere a prețului de cost pot fi enumerate: adoptarea unor soluții tehnologice corespunzătoare pentru componentele utilajului, folosirea elementelor standardizate sau normalizate, aplicarea concepției modulare, etc.

Al doilea aspect important care determină complexitatea utilajului este cel economico-social cu referire directă asupra protecției și ușurării muncii operatorului uman. Se au în vedere asigurarea condițiilor de muncă care să determine o obosire minimă a operatorului uman și protecția maximă a acestuia față de eventualele accidente de muncă.

Obosirea minimă presupune mecanizarea și automatizarea parțială sau totală a utilajului, adică a unora sau a totalității operațiilor manuale, iar eliminarea sau prevenirea accidentelor de muncă se realizează prin dotarea utilajului cu diferite mecanisme de protecție corespunzătoare.

Raportând aceste cerințe la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact, unde se dezvoltă fluxuri luminoase intense, însoțite de nivel ridicat de zgomot, protecția operatorului uman devine una dintre principalele preocupări ale proiectantului. Ținând cont că procesul eroziv este determinat de o mișcare cu viteză relativă mare între obiectul de prelucrat și obiectul de transfer rezultă că problema protecției devine și mai acută.

Evident că satisfacerea celor trei mari probleme ridicate de utilizarea și exploatarea utilajului este în general diferită deoarece există o interdependență reciprocă pronunțată. Spre exemplu mecanizarea și automatizarea utilajului duc la creșterea productivității acestuia și la obosirea minimă a operatorului uman dar au ca efect concomitent creșterea costului acestuia, care ulterior se reflectă în costul piesei prelucrate. De aceea este necesar să se găsească soluția optimă, ținându-se seamă de posibilitățile optime existente și de ponderea fiecărui factor.

La proiectarea unui utilaj tehnologic se parcurg în mod obligatoriu trei faze distincte determinate de **proiectarea cinematică, proiectarea organologică și proiectarea formei** (Fig.6.2.).

Conform legăturilor 1, 2, 3 în ambele sensuri, rezultă că cele trei faze se intrteapătrund iar soluțiile adoptate se influențează reciproc, aceasta deoarece proiectantul trebuie să cunoască și să rezolve prin proiect mai multe cerințe determinate de: scopul utilajului proiectat, principiile funcționale ale acestuia, tehnologia de fabricație a elementelor componente, tehnologia de montaj, tehnologia de control, etc.

Scopul utilajului este impus de beneficiar sau de condițiile de prelucrare necesare, proiectantul trebuind să satisfacă toate cerințele care pot fi de la caz la caz foarte diversificate. Aceste cerințe variază în funcție de piesele care urmează să fie prelucrate, de tipul producției în care trebuie să se încadreze utilajul proiectat, de scopul urmărit prin proiectare ș.a.

Utilajul proiectat trebuie să îndeplinească un complex de condiții, cum sunt: cost redus, reglarea cât mai ușoară și reparații la intervale cât mai mari, reglare ușoară, întreținere ușoară etc. Satisfacerea optimă a acestor cerințe care în fapt se referă pe de o parte la asigurarea unei fiabilități

corespunzătoare pentru utilaj, iar pe de altă parte o exploatare ușoară a acestuia, impune proiectantului să posede un mare volum de cunoaștințe de specialitate și de cultură tehnică generală cât și o suficientă experiență în domeniul construcției de utilaje și a tehnologiei specifice.

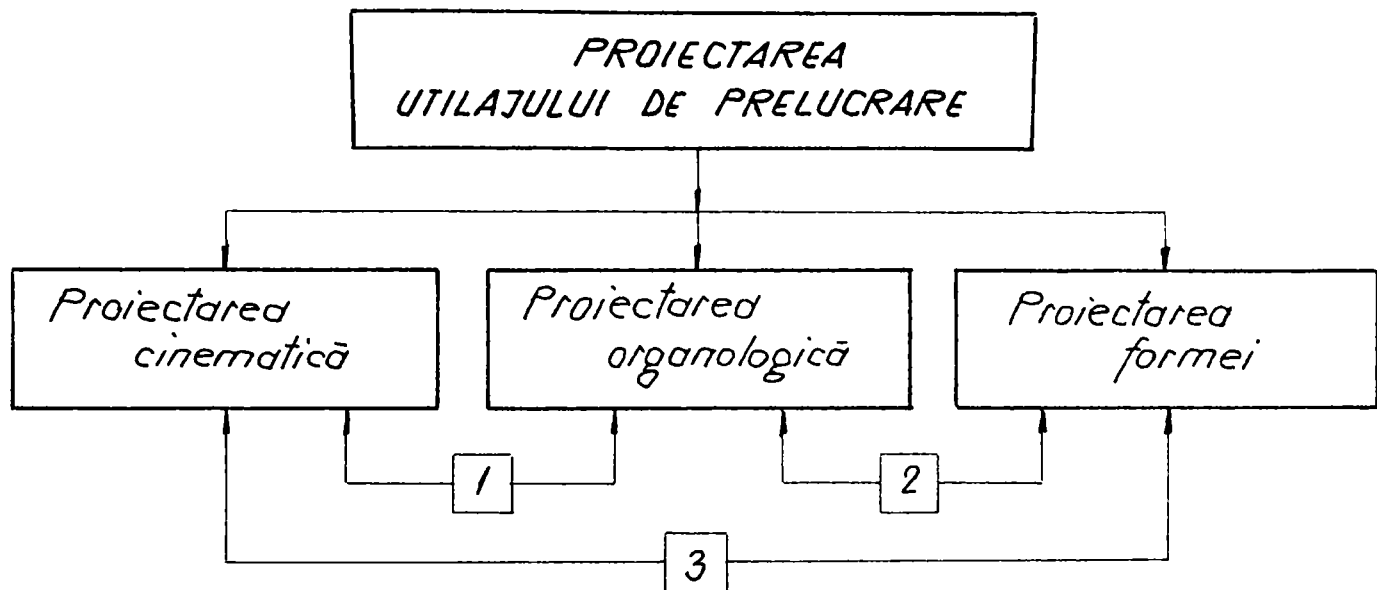


Fig.6.2.
Fazele proiectării utilajelor de prelucrare.

După cum rezultă din figura 6.2. prima etapă principală de proiectare a unui utilaj este proiectarea cinematică care poate conduce la soluții, care se resfrâng asupra proiectării organologice (1) a formei (3) dar și a tehnologiei de prelucrare a reperelor de prelucrare respectiv a celei de montaj și al căror efect final influențează costul mașinii, exploatarea și reglarea ei cât și durabilitatea ei în funcționare.

La finalizarea proiectării cinematice sau parțial concomitent cu aceasta se desfășoară proiectarea organologică cu influențarea directă a proiectării formei dar și cu influențe inverse reciproce cu proiectarea cinematică. La această etapă de proiectare trebuie să se respecte cerințele proiectului cinematic al utilajului ținând seama de condițiile de proiectare a fiecărui organ în parte, de tehnologia de execuție și de costul acestuia. Proiectarea organologică este condiționată hotărâtor de numărul de utilaje identice care trebuie fabricate. Într-un fel se pun problemele în cazul fabricării utilajelor în serie mare, unde aspectele privind tipizarea, standardizarea și economia de materiale deficitare au o pondere foarte mare în comparație cu cazul fabricării unui unicat sau al unui număr mic

de utilaje identice unde preponderent devine aspectul modular. Considerarea acestor aspecte se reflectă asupra modului de proiectare a elementelor componente ale utilajului, asupra formei acestora și evident și asupra tehnologiei de fabricație a lor.

Ca și în cazul proiectării utilajelor, proiectarea unui organ de mașină impune proiectantului să cunoască foarte bine scopul, principiul funcțional și tehnologia de execuție a acestuia.

Ultima fază a proiectării utilajului, dar de importanță asemănătoare cu primele două pe care trebuie să o rezolve proiectantul o constituie proiectarea formei utilajului care prin legăturile inverse (2) și (3) condiționează primele două faze. Forma mașinii depinde, în cea mai mare măsură, de forma batiului acesteia fiind complectată și definitivată de ansamblurile care se află, fixe sau mobile, pe batiu. La proiectarea formei utilajului trebuie avut în vedere și realizarea estetică a acestuia, adică împletirea utilului cu frumosul, având ca scop fundamental ușurarea muncii, protecția operatorului uman, crearea unei stări plăcute, de satisfacție, pentru eliminarea sau reducerea oboselii fizice.

6.1.2. Analiza comparativă a subsistemelor funcționale ale utilajelor de prelucrare prin E.E.R.C..

La ora actuală utilajele pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact pot fi grupate în trei mari categorii (fig. 6.3.). [16], [26], [35], [56], [61], [62], [63], [84], [17], [89], [108], [129], [130].

În urma unor analize a utilajelor de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC) și a standurilor existente pe plan mondial se poate conchide asupra subsistemelor funcționale de bază necesare unui utilaj (ștand experimental) de prelucrare prin EERC.

Având în vedere că această analiză comparativă trebuie să ofere posibilitatea alegerii corecte a soluției sau variantei constructive adaptate condițiilor concrete de prelucrare se consideră necesară sistematizarea tuturor soluțiilor și variantelor constructive. Acest lucru este prezentat în tabelul 6.1., unde acestea sunt prezentate referitor la subsistemele de bază ale utilajelor de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact.

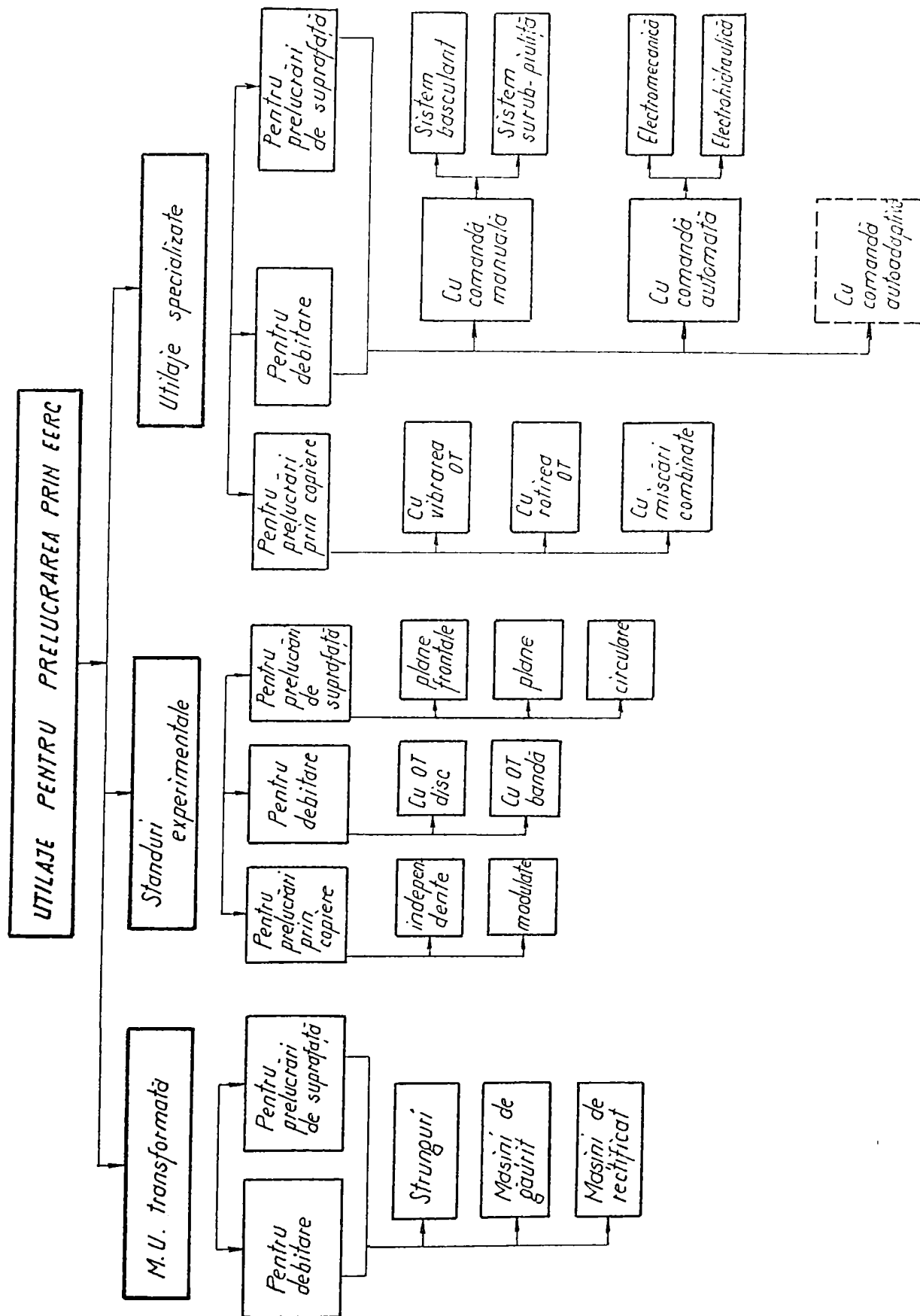


Fig. 6.1. Clasificarea utilajelor de prelucrare prin EERC.

Tabelul 6.1.

Nr. crt	SUBSISTEMUL UTILAJULUI	ROL FUNCȚIONAL	SOLUȚII
1.	Batiul	Asigurarea poziției relative corecte între suban-sambluri (în special între OP și OT)	<ul style="list-style-type: none"> - batiuri grinzi (batiuri simple); - batiuri cadru deschis (batiuri cu coloană); - construcții sudate (forme simple, producție individuală)
2.	Subsisteme de prindere și poziționare OP	Asigură poziția reciprocă necesară între OP și OT și menține poziția OP în timpul prelucrării. În unele cazuri asigură mișcarea relativă între OP și OT.	<ul style="list-style-type: none"> - mase deplasabile pe una sau două direcții; - dispozitive de prindere universale (menghine); - dispoziția de prindere adaptată formei OP; - mișcare de rotație (manual sau mecanizat) a OP (avans rotativ); - mișcare de avans liniar (manual sau mecanizat); - electromecanic, electrohidraulic)
3.	Subsistem de antrenare OT	Asigură viteza relativă necesară prelucrării și reglarea ei între anumite limite.	<ul style="list-style-type: none"> - cu motor de curent continuu; - cu motor de curent alternativ; - transmisii cu curele trapezoidale - transmisii articulat telescopice; - variatoare de turație; - roți de curea schimbabile
4.	Subsistem de asigurare a avansului de lucru	Asigură menținerea constantă a unor parametrii în spațiul de lucru (presiunea, densitatea de curent, căderea de tensiune).	<ul style="list-style-type: none"> - prin intermediul OT; - prin intermediul OP; - coloane de ghidare; - ghidaje liniare; - sisteme basculante; - acționare manuală; - acționare electro-mecanică; - acționare electro-hidraulică; - acționare cu mase de antrenare reglabile, etalonate
5.	Subsistem de asigurare a agentului de răcire	Asigură existența în spațiul de lucru a agentului de răcire adaptat condițiilor determinate de OP și OT	<ul style="list-style-type: none"> - alimentarea de la rețeaua de apă; - alimentarea de la subansamblul propriu; - cu un jet; - cu două sau mai multe jeturi; - cuvă de colectare;
6.	Subsistemul de alimentare cu energie electrică	Asigură tensiunea și curentul de lucru care în spațiul de lucru se transformă în energie distructivă condițio-	<ul style="list-style-type: none"> - surse universale; - surse specializate; - transformatoare; - generatoare; - redresoare;

Nr. crt	SUBSISTEMUL UTILAJULUI	ROL FUNCȚIONAL	SOLUȚII
		nând prelucrarea.	- perii cu bucușă; - perii cu flanșă
7.	Subsistemul de protecție	Asigură protecția operatorului și a mediului înconjurător.	- apărători pentru OT; - apărători pentru transmisiile prin curele; - incinte de lucru pentru protecție fonică și/sau față de radiațiile luminoase; - panouri absorbante
8.	Subsistemul de comandă și control	Asigură exploatarea rațională a utilajului (ștandului), corelarea unor mișcări și funcționării, vizualizarea unor parametrii.	- panouri de comandă; - circuite de comandă condiționate; - comenzi auto-adaptive; - comenzi cu microprocesoare; - aparate de măsuri și control (A, V, n, F)

Din analiza diferitelor soluții constructive realizate este posibilă identificarea acelor variante care răspund cel mai bine condițiilor concrete care trebuiesc îndeplinite.

O altă abordare posibilă pentru analiza utilajelor de prelucrare prin EERC este cea creativ-științifică [16], [26].

În principiu fluxul sintezei utilajelor de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact (flux valabil și pentru alte utilaje de prelucrare tehnologică), începe de la o analiză asemănătoare cu cea desfășurată până în prezent.

Studiul creativ și analiza inginerescă a soluțiilor existente în cadrul analizei generale urmărește eliminarea totală sau parțială a restricțiilor fenomenologice, constructive și tehnologice, respectându-se cu rigurozitate funcțiile și structura utilajelor de prelucrare.

Proiectarea utilajului sub forma modelului experimental sau sub forma utilajului cu destinație industrială este condiționată pe de o parte de asigurarea funcției globale și a funcțiilor parțiale specifice, iar pe de altă parte de asigurarea funcționalității și a fiabilității fiecărui subsansamblu sau reper component.

Proiectarea creativă științifică presupune ca următoarea etapă elaborarea diagramelor de idei și identificarea soluțiilor, existente sau noi care vor fi supuse ulterior unei analize detaliate în special a soluțiilor rezultate ca "noi" utilizând în acest scop metode și tehnici creative. Tehnica creativă presupune elaborarea diagramei de idei și a matricii morfologice, care asigură realizarea de noi combinații între parametrii și criteriile luate în considerare.

Efectuarea unor astfel de sinteze și studii pentru utilaje de debitare cu obiect de transfer sub formă de disc în mișcare de rotație, respectiv cu obiect de transfer sub formă de bandă metalică au evidențiat existența necesară a subsistemelor prezentate în tabelul 6.1, chiar dacă ele apar mai detaliat.

Pentru decizia asupra variantelor rezultate din studiul creativ bazat pe diagrama de idei și a matricii morfologice se recurge la determinarea unor criterii de clasificare pentru care se acordă punctaje. Pentru selectarea corespunzătoare a variantelor respectând atât criteriile tehnice cât și cele tehnice se recurge de obicei la tehnica de calcul deoarece, de regulă numărul variantelor rezultate este relativ mare.

În acest fel rezultă o variantă care este acceptată atât din punct de vedere tehnic cât și din punct de vedere economic.

Cu toate că acest mod de concepere și proiectare a unui utilaj (ștand experimental) prezintă foarte multe avantaje, în special datorită obiectivității alegerii soluțiilor, se poate considera că nu todeauna va oferi soluția cu cea mai bună aplicabilitate în condiții concrete. Această observație trebuie înțeleasă, prin faptul că în foarte multe cazuri, posibil chiar în majoritatea lor, condițiile concrete care se impun și care restricționează proiectarea și execuția să conducă la soluții în opoziție cu cele rezultate prin analiza creativ-inginerească.

6.2. Echipamente utilizate la cercetarea experimentală.

Principalul echipament utilizat a fost un stand experimental de prelucrare prin E.E.R.C. cu O.T. disc existent în laboratoarele Universității "Lucian Blaga" Sibiu, Facultatea de Inginerie. [10], [9]. Principalii parametri de reglare ai standului sunt:

- turația O.T. (variabilă în trepte).....3860, 3340, 2865 rot/min;
- viteza periferică a O.T. (variabilă în trepte).....40,35,30 m/s;
- diametrul O.T. utilizat.....200mm;
- puterea motorului principal.....1,5kW;
- puterea motorului secundar.....0.25kW;
- tensiunea de alimentare a OT și OP.....12,24 V;
- intensitatea curentului de alimentare (variabilă în trepte).....30-200A;
- turația șurubului conducător (variabilă în trepte).....28-44 rot/min;
- viteza de avans (variabilă continuă).....56-80 mm/min;
- cursa maximă a saniei.....220 mm;

- diametrul maxim al O.P.....67 mm;
- dimensiuni de gabarit.....500*450*280 mm.

Schema bloc a standului se prezintă în figura 6.4.

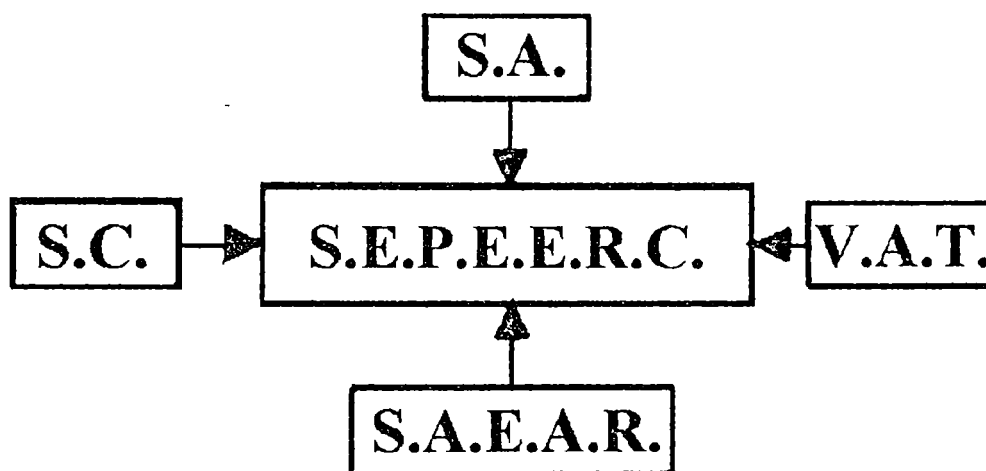


Fig. 6.4.

SA – sursă de alimentare, formată dintr-un transformator cu bobină deplasabilă, alimentat de la rețea cu 220V, 50 Hz, care are rolul de a sigura tensiunea de lucru și densitatea de curent expusă în datele inițiale de proiectant;

SC – sistem de comandă realizat sub forma unui panou, cu care se asigură comanda mișcărilor OT și OP;

VAT – cariat de avans tehnologic, format dintr-un reostat care permite obținerea unei game variabile de avansuri de OP prin modificarea turației unui șurub conducător;

S.A.E.A.R. – sistem de alimentare, evacuarea agentului de răcire; agentul de răcire este apa industrială care se preia de la instalația de alimentare a atelierului;

S.E.P.E.E.R.C – stand experimental de prelucrare prin E.E.R.C.

În concordanță cu schema bloc a unui utilaj de prelucrare prin E.E.R.C. și în structura standului experimental se regăsesc următoarele subansamble de bază:

- batiuri;
- sisteme de alimentare a O.T.;
- sistem de antrenare și poziționare a O.P.;
- sistem de circulație a agentului de răcire;
- sistem de alimentare cu energie a O.T. și O.P.;
- sistem de protecție.

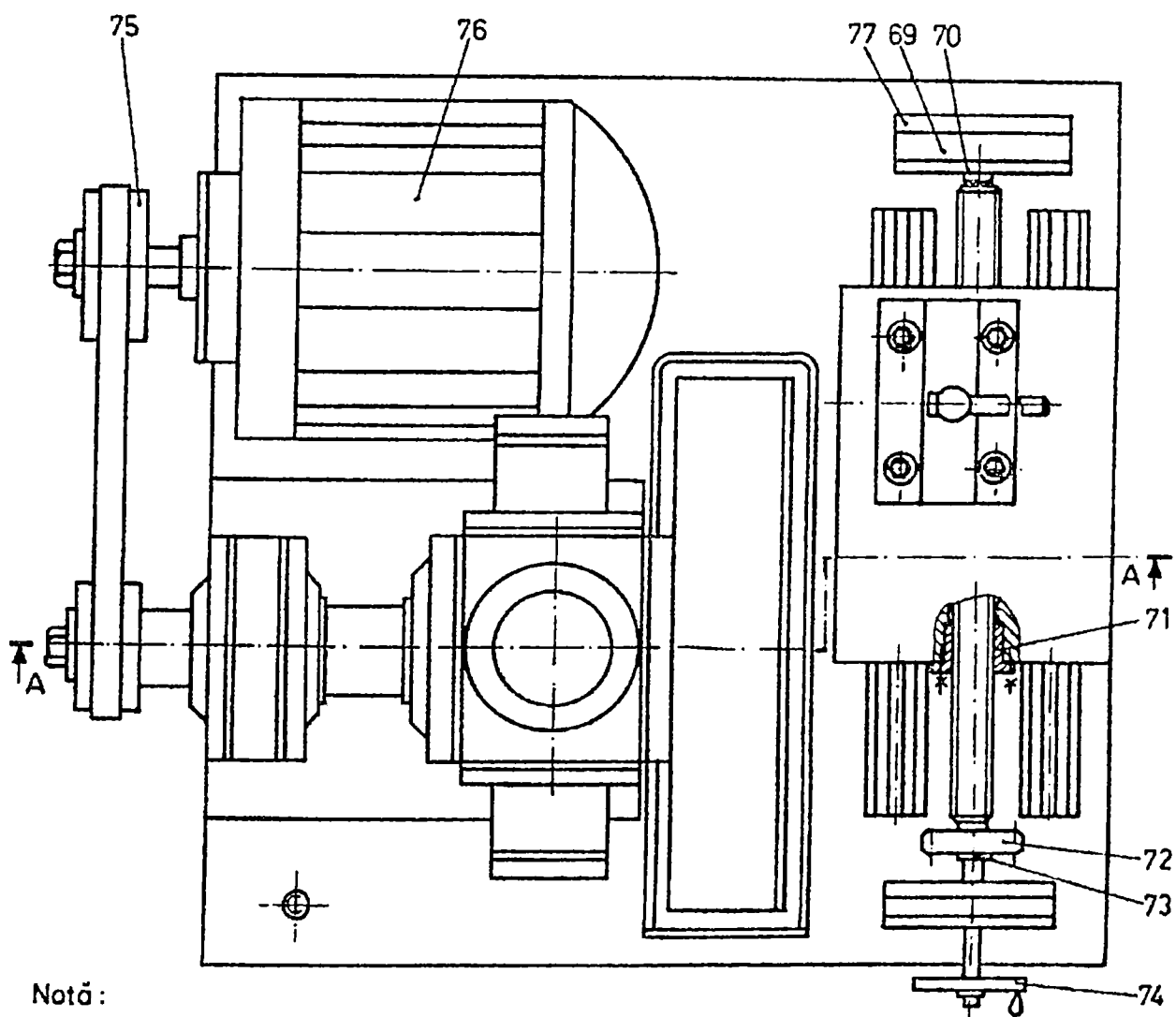
Componența generală a standului experimental este prezentată în figura 6.5. și 6.6.

În timpul experimentărilor au fost utilizate și alte echipamente, care sunt prezentate succint în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2.

Nr. crt	Denumirea	Tipul	Caracteristici	Parametri măsurați	Simbol	U.M.
1	Ampermetru feromagnetic	AP-52	Ca =1 (clasa de precizie)	Intensitatea curentului	I	[A]
2	Voltmetru feromagnetic	VP-51	Cv =1 (clasa de precizie)	Tensiunea curentului	U	[V]
3	Cronometru electric	PL-EAW	Ct =1 (clasa de precizie)	Timpul de tăiere	Tt	[s]
4	Balanța analitică	MB-C	50..200mg (dom. de cântărire)	Greutatea probelor	Gp	[g]
5	Microdurimetrul Hanemann	mph 100	Piramidă de diamant tip Vickers	Vichers Hv0.1.	Hv 0.1	-
6	Rugozimetru	TAYLOR-	subtronic 3	Rugozitatea supraf.	Ra	[μm]

Nr. crt	Denumirea	Tipul	Caracteristici	Parametri măsurați	Simbol	U.M.
	electronic	HOBSON		debitate		
11	Șubler de exterior și interior	I.M.F.Buc.	domeniul de măsurare-150mm	Lățimea tăieturii	Lt	[mm]



Notă:

Motorul pentru realizarea mișcării de avans și placa de contact sunt îndepărtate

Fig. 6.6.

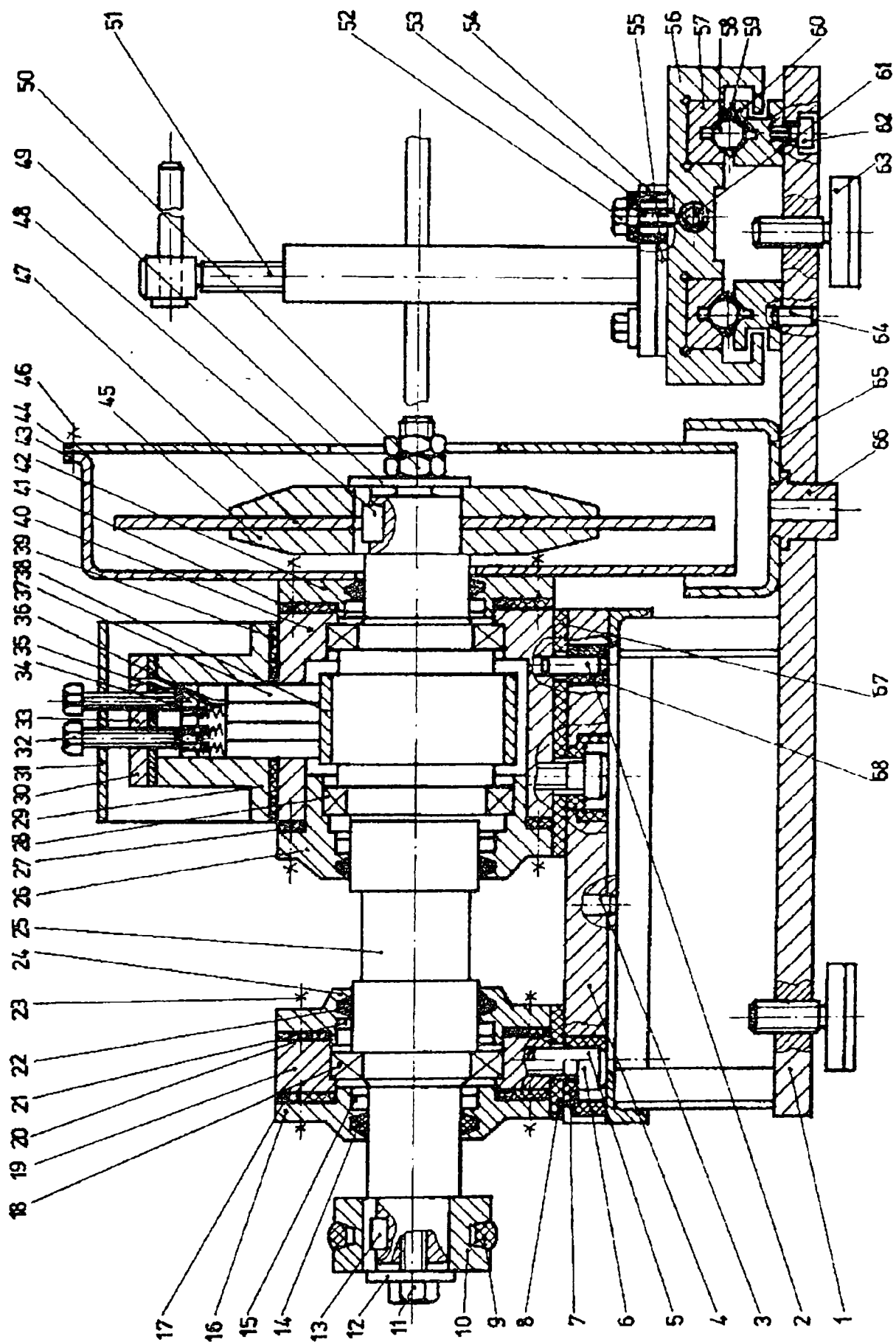


Fig. 6.5.

Se face precizarea că prin specificul construcției sistemului de antrenare și poziționare a O.P., acesta realizează și funcția de reglare a interstițiului dintre O.T. și O.P..

7.

**CONTRIBUȚII CU PRIVIRE LA
MODIFICAREA TRANSFERULUI SUBSTANȚIAL
LA PRELUCRAREA DIMENSIONALĂ PRIN
EROZIUNE ELECTRICĂ CU RUPERE DE
CONTACT A ALUMINIULI ȘI A ALIAJELOR LUI.**

Sarcinile deosebite puse în fața industriei în etapa actuală pot fi rezolvate integral și la un înalt nivel calitativ numai printr-o abordare științifică și o conducere optimală a proceselor tehnologice. [19], [20], [80], [98], [122]. Pentru activitatea de raționare și de luare a deciziilor în conducerea unui proces, știința pune la dispoziție mijloacele necesare sub formă de modele - fizice și matematice - capabile să reacționeze la orice schimbare a condițiilor de lucru.

Prin aplicarea științei ca forță productivă, munca oamenilor se deplasează din ce în ce mai mult spre activitatea de raționare și de luare a deciziilor, munca de acționare fiind preluată treptat de mașini și utilaje automatizate. Deoarece cercetarea pe modele fizice prezintă unele dezavantaje importante, cum ar fi durata îndelungată a cercetării cu consum mare de muncă intelectuală precum și imposibilitatea cuprinderii factorilor economici, tendința actuală în conducerea proceselor tehnologice este utilizarea pe scară tot mai largă a modelelor matematice. Acestea reproduc procesul cercetat cu ajutorul unor relații funcționale și permit găsirea condițiilor optime de acționare într-un timp mult mai scurt și cu cheltuieli materiale mult mai reduse decât în cazul utilizării modelelor fizice. [118], [119].

7.1. Strategia experimentală.

Experimentul a servit din totdeauna ca mijloc de cunoaștere a realității înconjurătoare, fiind un criteriu de verificare a ipotezelor și teoriilor.

Mult timp s-a crezut că *alegerea strategiei experimentului* și realizarea sa sunt determinate de experiența și intuiția experimentatorului, matematica fiind utilizată doar la prelucrarea rezultatelor.

Creșterea vertiginoasă a volumului cercetărilor experimentale a adus în centrul atenției problema creșterii eficienței experimentului; apariția calculatoarelor electronice a permis realizarea unor asemenea scheme de experimentare care să contribuie la creșterea sensibilă a randamentului în cercetare.

A apărut în acest context teoria matematică a experimentului și în cadrul ei programarea (organizarea) experimentului .

Deși programarea experimentului se studiază ca o ramură a ciberneticii, din punct de vedere istoric ea s-a conturat înaintea formulării principiilor ciberneticii, primele lucrări teoretice în acest domeniu datând din perioada 1923-1925.

Bazele programării experiențelor au fost puse de cunoscutul matematician englez R. A. FISCHER, prin cartea sa " The design of experiments " apărută în 1935.

În 1951 problema a fost dezvoltată de către Box și Wilson , care au realizat *programarea factorială* și au descris regiunea optimului cu ajutorul polinoamelor (programe ortogonale).

Principiile *programării rotabile* au fost formulate în 1957 de către Box și Hunter, iar în 1959 Satterthwaite a propus metoda *balanței aleatoare*.

Metodele de programare experimentală se utilizează la studierea diferitelor obiecte tehnologice care se deosebesc , în primul rând , prin natura proceselor care se desfășoară în cadrul lor.

Prin *obiect tehnologic* se va subînțelege procesul tehnologic tipic care se desfășoară într-un agregat de o anumită construcție, sau un flux tehnologic care cuprinde diferite procese și agregate. [120], [118]. Procesele care au loc în cadrul obiectelor tehnologice sunt caracterizate de variabile între care există anumite legături funcționale (cauză - efect).

Variabilele care joacă rol de cauză se numesc *variabile de intrare* (factori ai procesului), iar cele care joacă rol de efect se numesc *variabile de ieșire*. Se pot întâlni următoarele cazuri

referitoare la variabilele de intrare; (1) variabile de intrare controlate, dar necomandate (x_1, x_2, \dots, x_n); (2) variabile de intrare controlate și comandate ($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$); (3) variabile de intrare necontrolate și necomandate (Z).

Observație. Noțiunea de variabilă necontrolată dar comandată nu are sens din punct de vedere al conducerii.

Variabilele de ieșire (y_1, y_2, \dots, y_m) caracterizează starea obiectului în funcție de modificările variabilelor de intrare și din acest motiv ele se numesc *variabile de stare*. []

Deoarece variabila de perturbație nu se controlează (caracterul variației ei nu poate fi determinat), Z se consideră o variabilă aleatoare, care are o anumită lege de distribuție. Obiectul tehnologic supus experimentării se caracterizează prin faptul că toate variabilele de intrare trebuie să fie comandate. Acest lucru este cerut de însăși programarea experimentului, care presupune o intervenție activă în desfășurarea proceselor; în aceste condiții separarea variabilelor de intrare în variabile comandate și necomandate nu are sens. Pentru a face o distincție clară, se introduce noțiunea de *obiect al cercetării*, adică obiect tehnologic studiat prin metodele programării experimentale. []

Experimentul se programează conform unui plan determinat, stabilit anterior, optim din punct de vedere al algoritmului modificării factorilor, realizarea lui asigurând o influență complexă asupra stărilor variabile ale obiectului cercetat.

Diversitatea scopurilor urmărite în cercetare generează o multitudine de programe experimentale, teoria experimentului matematic punând la dispoziție o serie de concepte necesare realizării scopurilor cercetării. [20], [19].

7.1.1. Experimentul o problemă esențială în domeniul ingineriei.

Sistemele tehnologice sunt sisteme concrete, având o structură constituită, cel puțin în parte, din elemente fizice și o funcționalitate determinată, exprimată prin capacitatea de realizare a unor transformări specifice ale substanței, energiei și informației (fig. 7.1.).

Legăturile de cauzalitate ce caracterizează funcționalitatea sistemelor tehnologice se exprimă, într-o formă generală, prin ecuația de ieșire (funcția de răspuns) a acestora :

$$y = f(x, s) \quad (7.1.)$$

în care :

– intrările x reprezintă acțiuni (comenzi) exercitate asupra sistemului;

- ieșirile y sunt atribuite ale sistemului, modificate din cauza variației intrărilor, atribuite care pot fi:
 - dependente direct de intrări;
 - dependente indirect, prin intermediul unor mărimi caracteristice structurii sistemului numite stări s , condiționate de intrări, în forma:

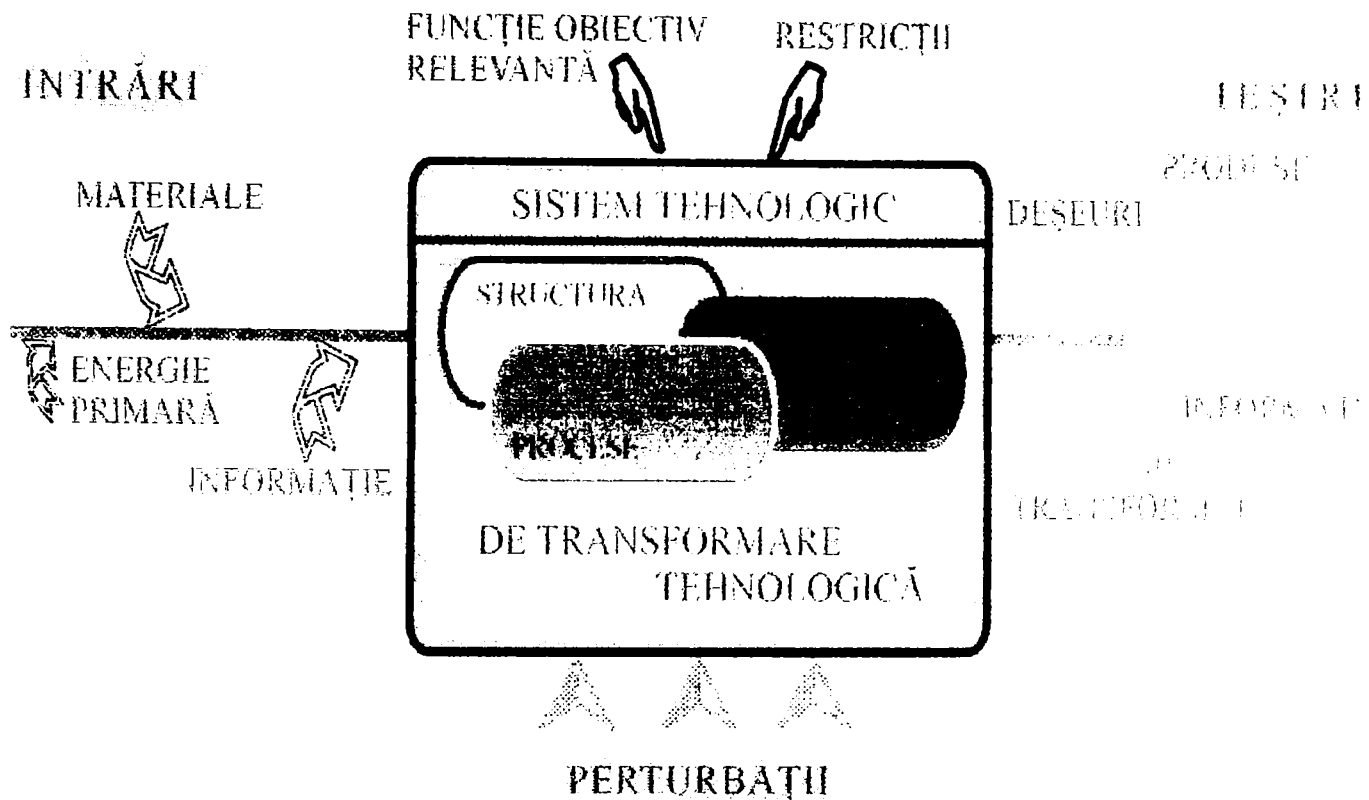


Fig. 7.1.

Sistemul tehnologic. Legături de cauzalitate.

În rândul proprietăților interne (structurale) generale ale sistemelor trebuie menționate, [20]:

- **accesibilitatea** – capacitatea sistemelor de a accepta $N_x \square 1$ intrări și $N_y \square 1$ ieșiri;
- **observabilitatea** – proprietatea sistemelor de a permite identificarea cel puțin a unei stări s și implicit cunoașterea structurii, atunci când sunt date x și y ;
- **controlabilitatea** – proprietatea sistemelor de a realiza o variație a ieșirii y atunci când intervine o modificare a intrării x ; sistemele se consideră total controlabile dacă orice componentă a intrărilor influențează toate componentele ieșirilor și respectiv parțial controlabile, dacă nu toate componentele ieșirilor sunt influențate de orice componentă a intrărilor.
- **stabilitatea** – capacitatea sistemelor de a reveni sau de a tinde să revină în urma unei perturbații la starea anterioară perturbației sau la altă stare de echilibru staționar.

În majoritatea cazurilor reale și mai ales în domenii moderne de vârf, sistemele tehnologice sunt sisteme, [20]:

- ❖ complexe, caracterizate printr-un număr foarte mare de variabile independente asociate intrărilor, de natură fizico-chimică diferită (mărimi, fenomene, procese electrice, mecanice, termice, chimice etc.);
- ❖ slab organizate, deoarece funcționalitatea lor este condiționată de comportamente deterministe și stohastice ale structurii, iar funcțiile obiectiv pot fi realizate cu o certitudine limitată;
- ❖ cu caracter difuz, având interacțiuni dinamice puternice între variabile, ceea ce are drept consecință alterarea preciziei transformărilor realizate.

În aceste condiții, relevarea esenței proceselor de transformare tehnologică prin intermediul ecuației de ieșire/funcției de răspuns a sistemului tehnologic, acțiune numită în mod curent **identificare** sau **modelare matematică**, este extrem de dificilă, adeseori irezolvabilă la nivel global.

Un asemenea model matematic condiționează, de regulă, posibilitatea rezolvării corespunzătoare a unor probleme ingineresti fundamentale, cum ar fi:

- analiza sistemelor (determinarea structurii și funcționalității unui sistem tehnologic existent);
- sinteza sistemelor (conceperea unui sistem nou , având o anumită structură și funcționalitate);
- conducerea sistemelor (controlul informațional al evoluției sistemelor tehnologice , având ca obiectiv optimizarea funcționalității în raport cu o mulțime dată de criterii și restricții) .

În principiu identificarea sistemelor fizice de interes tehnologic - obiecte, fenomene, procese este posibilă în trei moduri :

- identificare analitică, adică determinarea modelului matematic pe baza cunoașterii legilor fizice, care guvernează starea și evoluția sistemului ;
- identificare experimentală (empirică) adică determinarea modelului prin prelucrarea matematică a datelor de intrări-ieșiri, obținute prin măsurări ;
- identificare mixtă, analitică și experimentală, adică determinarea modelelor pe baza unei structuri (forme matematice) prestabilite, folosind informațiile apriorice despre sistemul considerat și a valorilor numerice ale coeficienților de regresie corespunzători, estimate pe baza datelor rezultate experimental;

Pentru această ultimă variantă se recurge, de regulă, la experimente factoriale în care se variază simultan, pe nivele determinate, toate variabilele independente cu influență semnificativă asupra sistemului cercetat.

Pe această bază, devine posibilă testarea obiectivă a adecvantei modelului empiric cu procesele reale de transformare specifice sistemului și se deschid perspective apropiate pentru evidențierea condițiilor optime de desfășurare a acestora. [122].

Experimentul (cercetarea experimentală) reprezintă o intervenție controlată în evoluția (funcționarea) unui sistem, având ca finalitate:

- verificarea și adâncirea cunoștințelor privind acțiunea factorilor de influență asupra funcțiilor de răspuns ale sistemului (experiment pasiv, de evaluare și atestare a unei stări de fapt);
- determinarea condițiilor optime de funcționare a unui sistem în raport cu criteriile și restricții impuse (experiment activ, de optimizare);

În condițiile actuale este deosebit de utilă reprezentarea experimentului (mai ales a celui de finalitate tehnologică) ca sistem cibernetic (fig. 7.2.). [20], [122].

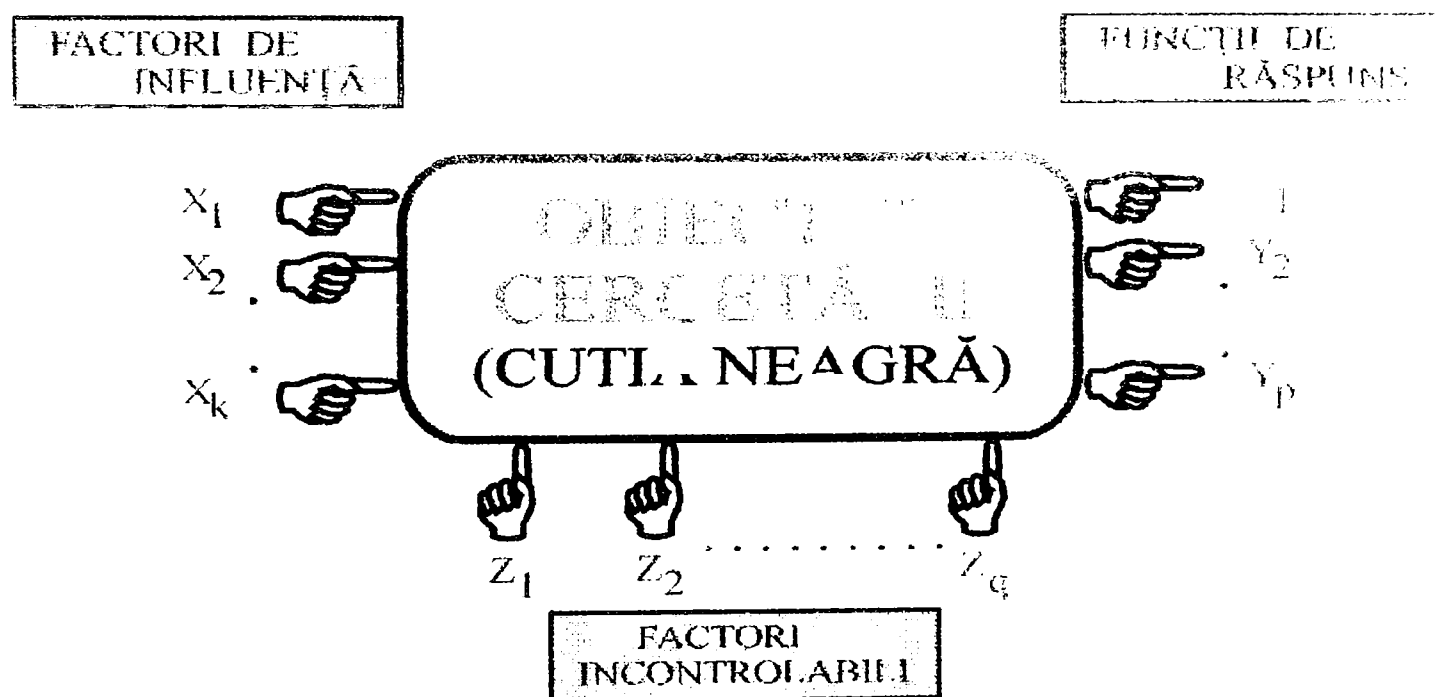


Fig. 7.2.

Reprezentarea experimentului ca sistem cibernetic.

Obiectul cercetării integrează sistemul supus cercetării experimentale (un sistem fizic real sau un model fizic al acestuia) cu mulțimea mijloacelor de încercare (testare) și măsurare necesare evaluării stării, comportamentului și evoluției sistemului respectiv.

Funcțiile de răspuns (funcții obiectiv, indicatori de performanță, criterii de optimizare) definesc și evaluează cantitativ comportamentul și tendințele de evoluție ale sistemului ce se constituie obiect al cercetării, în condițiile date.

După natura lor, funcțiile de răspuns pot fi economice (costuri, profit, rentabilitate), tehnico-economice (producție fizică, calitatea și fiabilitatea produselor) tehnologice (productivitate, proprietăți mecanice și fizico chimice de material precizia de execuție a produselor), agronomice, estetice sau complexe.

Factorii de influență (variabile independente) reprezintă modalități și mijloace de influențare a compartimentului obiectului cercetării, corespunzător obiectivelor urmărite prin experimentul efectuat.

Structura experimentului este definită prin numărul și condițiile de desfășurare a încercărilor necesare și suficiente pentru realizarea obiectivelor cercetării.

La elaborarea structurii experimentului avut în vedere de tipul experiment factorial de ordinul k s-a avut în vedere:

- ❖ în cadrul unei încercări, fiecare factor a putut lua una și numai una din mulțimea valorilor disponibile în domeniul său de existență;
- ❖ mulțime determinată de nivele ale factorilor a definit definește una din stările posibile ale obiectului cercetării și a materializat posibilitatea efectuării unei încercări;
- ❖ mulțimea combinațiilor posibile ale nivelelor factorilor de influență a determinat mulțimea stărilor obiectului cercetării și deci volumul experimentării a fost:

$$N = p^k \quad \text{încercări} \quad (7.3.)$$

unde : k – numărul factorilor, iar p – numărul nivelelor de variație ale factorilor.

- ❖ realizarea obiectivelor cercetării în situația în care experimentul nu ar fi controlabil în mod absolut (asupra obiectului cercetării acționează întotdeauna și factori incontrollabili, de exemplu temperatura, presiunea și umiditatea mediului ambiant) și rezultatele sale nu sunt perfect reproductibile (există întotdeauna erori și incertitudini de măsurare), obligă adeseori la replicarea încercărilor, adică la repetarea acestora prin reducerea obiectului cercetării în condițiile inițiale (măsurarea repetată a funcției obiectiv sau a elementelor acesteia în cadrul aceleiași încercări nu este replicare) astfel s-au realizat 3(trei) replici pentru fiecare caz în parte în aceleași condiții inițiale;
- ❖ definirea completă a structurii unui experiment impune precizarea succesiunii de efectuare a încercărilor programate. În lipsa unor restricții, ce țin de funcționarea și stabilitatea obiectului experimentării, este ideal ca această succesiune să fie aleatoare ;

Notă: Pentru sistemele tehnologice, la care numărul factorilor de influență și a nivelelor de variație este în mod natural mare, se pune acut problema stabilirii unei strategii a experimentării, care să permită minimizarea numărului de încercări și implicit a costurilor cercetării.

Algoritmul general al unei cercetări experimentale moderne, algoritmul care de altfel a fost folosit a fost reprezentat intuitiv în figura 7.3. [19], [20], [122].

Se remarcă existența unor cicluri complete de investigație, organizate iterativ și plasate simbolic pe o spirală convergentă spre obiectivele cercetării experimentale.

Fiecare ciclu în parte a inclus 4 (patru) etape consecutive și anume:

- ◆ cunoașterea aprofundată a obiectului cercetării și adoptarea, pe această bază, a structurii modelului matematic inițial, care leagă funcțiile de răspuns de factorii de influență existenți;
- ◆ conceperea programului de experimentare, corespunzător numărului și nivelelor de variație ale factorilor de influență, precum și numărului de replici și randomizării necesare;
- ◆ realizarea efectivă a programului de experimentare asociat unui ciclu de experimentare dat;
- ◆ analiza statistică a rezultatelor experimentale obținute, finalizată prin estimarea coeficienților de regresie, testarea adecvantei și stabilirea intervalului de încredere (preciziei) modelului matematic adoptat inițial.

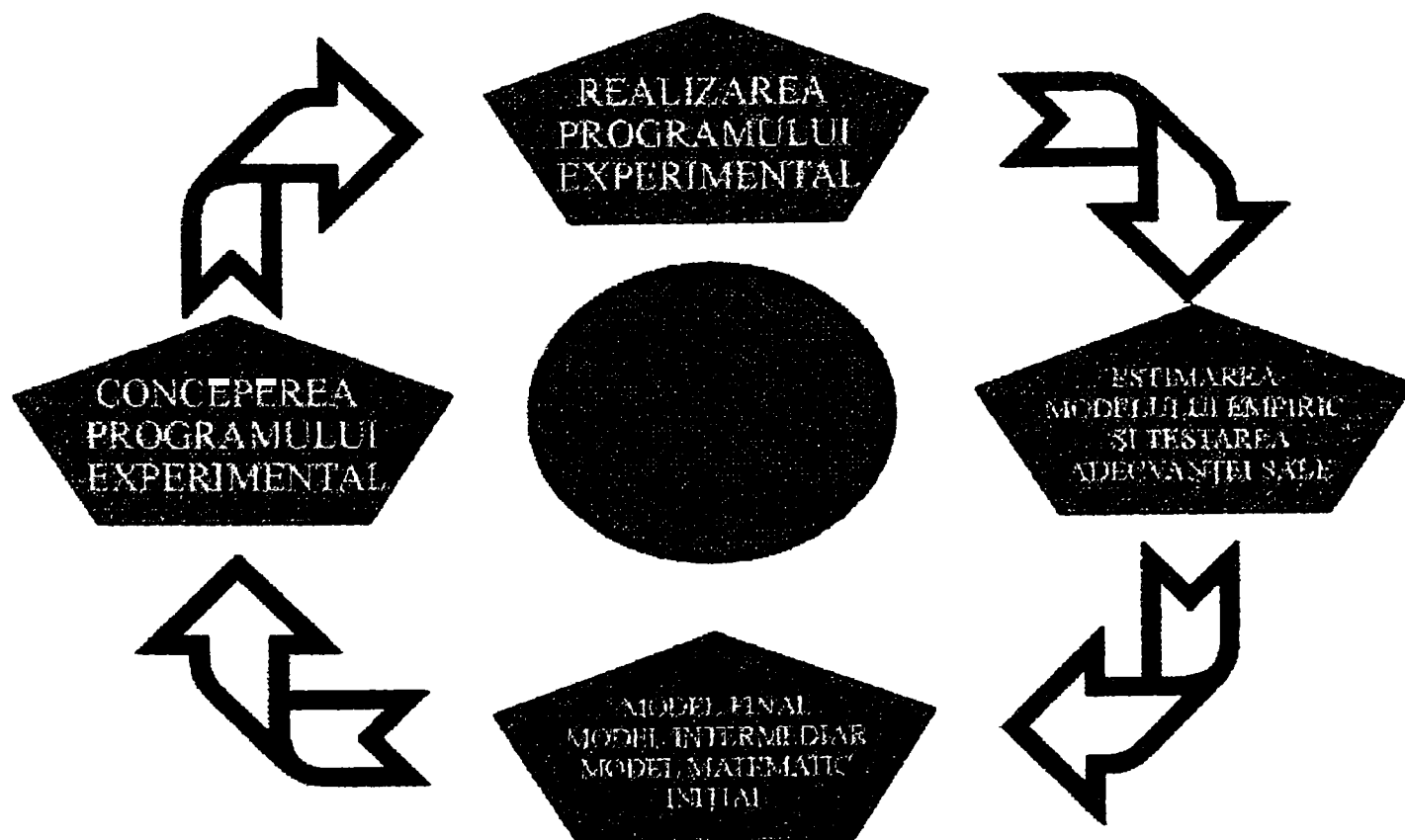


Fig. 7.3. Algoritmul cercetării experimentale la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și aliajelor sale.

Inadecvauța modelului matematic curent impune inițierea ciclului de investigație următor, în conceperea căruia se vor avea în vedere toate informațiile dobândite în ciclul anterior.

Pe măsura desfășurării cercetării experimentale, considerată în ansamblu, structura modelului matematic inițial și programul de experimentare pot fi supuse unor corecții eliminare sau adăugare de factori de influență, de modificare a domeniilor de variație a factorilor, de introducere a noi funcții de răspuns ș.a.

7.1.2. Strategii de experimentare în domeniul ingineriei.

Obiectivul primordial al oricărui experiment este modelarea matematică a acțiunii factorilor de influență asupra funcției obiectiv a sistemului (obiect, fenomen, proces) considerat, în forma de principiu, [119]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (7.4.)$$

În modelarea empirică, de regulă se acceptă aprioric o anumită formă a modelului matematic, care se consideră că aproximează cel mai bine modelul real, urmând ca desfășurarea experimentului să furnizeze datele necesare determinării coeficienților (constantelor) formei adoptate a modelului.

Obiectivele urmărite prin modelare sunt:

- studiul și analiza sistemului cercetat cu ajutorul modelului pentru obținerea de date mai complete și de noi legități ale acestuia;
- evidențierea mecanismului de acțiune a factorilor asupra sistemului cercetat;
- verificarea ipotezelor referitoare la interacțiunile interne ale sistemului;
- predicția stării și comportamentului sistemului;
- calculul și proiectarea sistemului;
- optimizarea sistemului în raport cu diferite criterii;
- conducerea sistemului în spațiu și timp.

Alegerea formei matematice a modelului implică recurgerea la: (fig. 7.4.). [20].

- cunoștințe și legități cu caracter general, aplicabile sistemelor fizice;
- informații cu privire la sisteme și modele similare cu cele cercetate;
- încercări proprii de modelare în domeniul respectiv.

În rezolvarea acestor probleme, la dispoziția cercetătorului stau două strategii principial diferite :

- strategia clasică (Gauss-Seidel), caracterizată prin ideea " un factor la un moment dat ";
- strategia modernă (Box-Wilson), caracterizată prin sloganul " toți factorii în fiecare moment ";

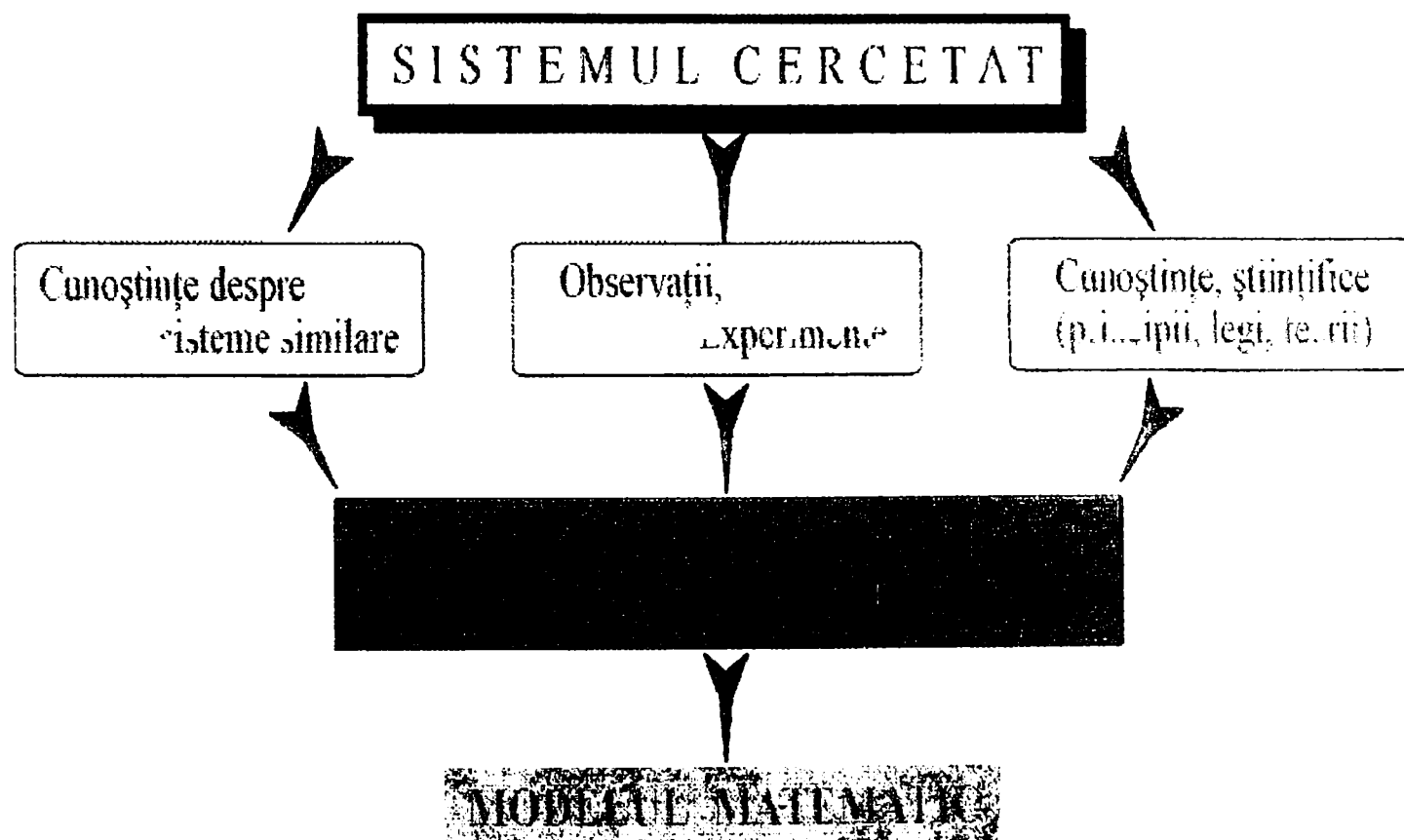


Fig. 7.4.

**Forma matematică a modelului experimental
utilizat la prelucrarea dimensională prin
eroziune electrică cu rupere de contact
a aluminiului și aliajelor sale.**

Strategia Gauss-Seidel reduce orice cercetare experimentală la o cercetare unifactorială, în sensul că, la un moment dat se reglează (se modifică) un singur factor; pentru ceilalți factori existenți se atribuie valori constante, mai mult sau mai puțin arbitrare, care pot exercita o influență semnificativă asupra rezultatului obținut; astfel, pentru evidențierea influenței unui factor, se utilizează numai o parte a încercărilor experimentale, ceea ce amplifică semnificativ, în cazul unui număr mare de factori de influență, volumul experimentării.

Strategia Box-Wilson utilizează un experiment factorial, caracterizat prin faptul că în fiecare încercare se modifică valoarea tuturor factorilor existenți; în consecință, influența fiecărui factor asupra valorilor y ale funcției obiectiv, este determinată de toate încercările incluse în cercetarea experimentală; volumul experimentului este astfel mult mai redus, iar certitudinea rezultatelor mult mai ridicată; pe de altă parte, modelul inițial (de regulă un model liniar), conține informații asupra direcției în care se găsește valoarea extremă a funcției de răspuns; pe parcurs, gradul modelului poate fi modificat relativ ușor, pentru a reflecta suprafață de răspuns.

7.1.3. Experimentul factorial privit ca experiment activ în construcția de mașini.

Stabilirea domeniului inițial de experimentare presupune:

- a) stabilirea domeniului de definiție a factorilor;
- b) analiza informației apriorice referitoare la modificarea funcției obiectiv la mici variații ale factorilor de influență.

Practic, stabilirea domeniului de experimentare se face în două etape:

1. stabilirea nivelului de bază (punctul central al experimentării);
2. stabilirea intervalului de variație.

Construcția matricii program a experimentării.

După cum s-a mai precizat, [], pentru prima etapă a cercetării, este suficientă variația factorilor pe două nivele, rezultând imediat volumul maxim al experimentării $N = 2^k$.

Experimentul se numește *factorial complet*, în cazul în care sunt incluse toate combinațiile posibile ale nivelelor factorilor.

Matricea program a experimentării se realizează tabelar, pe coloane figurând factorii, iar pe linii încercările componente ale programelor. Nivele factorilor s-au marchează în valori codificate (+ 1) și respectiv (- 1). Valorile funcției obiectiv, y , au fost determinate experimental.

Determinarea modelului matematic al experimentului.

Obiectivul experimentului factorial este stabilirea modelului, în prima fază polinomială liniar al sistemului investigat, adică determinarea valorii concrete a coeficienților b_j din relația (7.5.). [20], [94].

$$\tilde{y} = \sum_{j=0}^k b_j x_j \quad (7.5.)$$

Dacă se admite că fiecare factor are $p = 2$ nivele de variație, atunci, volumul experimentului factorial complet este $N = 2^k$ încercări ce trebuie să se realizeze în condițiile:

- randomizării succesiunii încercărilor;
- replicării încercărilor (dacă este cazul); în această situație se va lucra cu media aritmetică a rezultatelor replicilor pentru fiecare încercare, \tilde{y}_i ;
- păstrării omogenității dispersiilor empirice s^2_i pentru fiecare încercare;

În această situație metoda celor mai mici pătrate, [], [], permite determinarea coeficienților b_j cu relația :

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} y_i}{N} \quad , \quad j = 1, \dots, k \quad (7.6.)$$

Numărul coeficienților de regresie care pot fi determinați cu ajutorul relației (6.6.), inclusiv b_0 , este egal cu N .

Decizii în urma modelării liniare prin experiment factorial.

Principalii purtători de informații sunt coeficienții de regresie prin valoarea lor numerică și semn. Analiza coeficienților de regresie ne permite aprecierea amplitudinii și sensului de influență ale factorilor .

Din acest punct de vedere există două situații caracteristice :

- a) coeficienții sunt semnificativi;
- b) coeficienții sunt ne semnificativi.

a) Dacă toți coeficienții sunt semnificativi, este foarte important ca valorile lor să fie relativ apropiate (de același ordin de mărime), ceea ce indică faptul că modelul este în apropierea domeniului optim în raport cu toți factorii analizați.

b) Dacă o parte sau toți coeficienții sunt ne semnificativi, aceasta se poate datora, pe de o parte condițiilor de experimentare, în sensul că intervalele de variație ale factorilor au fost prea înguste sau eroarea experimentală a fost prea mare. În această situație , se recomandă refacerea cercetării cu corelațiile adecvate.

Pe de altă parte, caracterul nesemnificativ al factorilor poate deriva fie din menținerea în experiment a unor factori realmente nesemnificativi, fie din neincludere în experiment a unor factori semnificativi.

Un alt aspect al interpretării rezultatelor îl constituie analiza comparativă a informației apriorice și a informației rezultate din experimentul factorial. Această analiză comparativă trebuie făcută cu atenție și discernământ, întrucât se impune verificarea identității condițiilor de experimentare din punct de vedere al intervalului de variație și respectiv din particularitățile metodelor de experimentare care pot fi:

- unifactoriale (clasice);
- multifactoriale (moderne).

Pe baza acestei interpretări și cu dorința deplasării către optim, se pot adopta **deciziile**.

Deci erorile de experimentare, respectiv de informare precum și caracterul local al explorării spațiului multifactorial și respectiv caracterul monofactorial al informației apriorice sunt aspecte de care trebuie să se țină seama în interpretarea rezultatelor și implicit în luarea deciziilor.

Adoptarea deciziilor este influențată de trei categorii de elemente:

- adecvanța sau inadecvanța modelului liniar;
- caracterul semnificativ sau nesemnificativ al coeficienților de regresie;
- poziția relativă a domeniului explorat prin experiment în raport cu domeniul de optim.

Deciziile sunt luate în funcție de următoarele situații tipice:

a) Modelul liniar este adecvat.

- dacă toți coeficienții sunt semnificativi și de valori relativ apropiate, înseamnă că suntem aproape de optim. În această situație se poate deduce trecerea la o modelare empirică de ordin superior sau deplasarea în continuare către optim prin metode iterative;
- dacă toți coeficienții sunt semnificativi, există totuși diferențe mari între valorile lor numerice, se recomandă repetarea experimentului, cu corectarea în prealabil a intervalelor de variație și anume mărirea intervalelor aferente factorilor cu valori b_j mici și/sau micșorarea intervalelor aferente factorilor cu valori b_j mari; pe de altă parte se va încerca diminuarea erorilor experimentale prin creșterea numărului de replici și/sau perfecționarea metodelor de măsurare;
- dacă numai o parte coeficienților de regresie sunt semnificativi, este necesară acțiunea asupra intervalelor de variație a factorilor nesemnificativi, asupra reducerii erorii experimentale, asupra includerii în experiment sau a eliminării din experiment de factori; se recomandă, de asemenea, trecerea de la experimente factoriale fracționare, de rezoluție mai mică, la experimente factoriale fracționare de rezoluție mai mare sau la experimente factoriale complete;

- dacă toți coeficienții modelului sunt ne semnificativi, este un semnal că în conceperea și efectuarea experimentării sau strecurat greșeli importante; în această situație, se impune o revizuire globală a modelării liniare.

b) Modelul liniar nu este adecvat.

- dacă experimentul a fost corect conceput și realizat, este un semn că suntem în apropierea unui extrem și ca atare, sunt condiții favorabile trecerii la modelare de ordin superior;
- dacă modelul nu a fost corect conceput și/sau realizat, se impune reluarea cercetării experimentale, în primul rând prin reducerea intervalelor de variație a factorilor, respectiv prin introducerea în experiment de factori suplimentari, neglijați anterior; sunt situații în care se recomandă chiar modificarea punctului central al experimentării;

În general, inadecvanța modelului liniar, în situația în care nu există greșeli de concepție și/sau de prelucrare a datelor măsurate, se datorează creșterii curburii suprafeței de răspuns materializată prin:

- caracterul general semnificativ al unor interacțiuni;
- valoarea semnificativă a sumei coeficienților de regresie pătratici b_{ij} .

7.1.4. Software “STATISTIC DATA SYSTEM 2000” utilizat pentru analiza, premodelarea, modelarea, optimizarea și conducerea proceselor tehnologice.

7.1.4.1. Procesul de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact propus ca sistem cibernetic.

În general, cercetarea experimentală, [20], [99], se realizează fără o logică prea bine definită, fără o programare a experimentărilor de laborator și fără a se stabili de la bun început cu precizie ceea ce trebuie să se facă și de fapt ce se urmărește. De multe ori cei care experimentează ceva nou, fac în așa fel să obțină ceea ce vor ei, deși nu este normal. [99], [20].

Programarea asistată a experimentărilor la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, în vederea validării în general a unor teorii, înlătură greșelile, compromisurile și pune ordine în gândire, concepție, planificare și conducere.

Prelucrarea datelor experimentale prin metode statistice presupune cunoașterea și stăpânirea unor cunoștințe necesare.

Analiza proceselor tehnologice complexe, printre care se numără și procedeul de prelucrare dimensională prin eroziune electrică clasică dar și cu rupere de contact, [20], se poate realiza prin diverse metode.

Una din aceste metode este abordarea sistemică unde ca element central al acestui mod de a privi realitatea îl constituie sistemul. [20], [99].

Sistemul, [20], [99], definit prin prisma prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu rupere de contact, reprezintă un complex de obiecte independente care funcționează împreună pentru un obiectiv comun cu intrări și ieșiri într-un proces organizat de transformare.

O grupă care conține elemente care au un rol de sine stătător în cadrul sistemului se numește "*subsistem*".

Interacțiunile dintre elementele sistemului sau între subsisteme se definesc și în cazul de față *legături*.

Procesul de conducere este un proces informațional, bazat pe o metodologie care cuprinde:

- culegerea și pregătirea informației despre starea obiectului care trebuie condus;
- prelucrarea informației obținute pentru a ajunge la deciziile necesare;
- emiterea comenzii de executare a deciziilor de conducere.

Sistemele pot fi studiate la rândul lor prin diferite metode. Indiferent de metoda folosită la baza acestor teorii stă "*conceptul de modelare*".

Modelarea este metoda de studiere a proceselor tehnologice (obiectelor tehnologice) unde se experimentează asupra unui obiect oarecare (model) și nu asupra "originalului".

Pentru toate acestea se utilizează *experimentul*.

Procesul de modelare al procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, va trebui să respecte 2 (două) principii:

- experimentul pe modelul ales să fie cât mai simplu;
- cunoașterea modalității de calcul a parametrilor originalului pe baza studiilor efectuate pe model.

Literatura dedicată studierii procesului de prelucrare prin eroziune electrică, în general, evidențiază diverse tipuri de modele și anume:

- modele experimentale;
- modele fizice;
- modele matematice;
- modele cibernetice.

În procesul de studiere, analiză și conducere a procesului de *prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact* se caută anumite condiții optime ale obiectului cercetat folosindu-se modelarea matematică.

În altă ordine de idei referitor la modelarea experimentală propusă și prezentată în prezentul capitol al acestei lucrări de doctorat modelarea are la bază un algoritm matematic compus din ecuații care descriu corect interdependențele dintre variabilele procesului analizat.

Algoritmul folosit cuprinde etapele:

1. Formularea modelului:
 - 1.1. stabilirea scopului;
 - 1.2. delimitarea procesului;
 - 1.3. stabilirea variabilelor;
 - 1.4. stabilirea tipului de model.
2. Stabilirea funcției obiectiv.
3. Stabilirea ecuațiilor modelului matematic.
4. Verificarea modelului propus cu analiza erorilor și simulare pe calculator.

Literatura dedicată studierii obiectelor tehnologice, [99], [20], subliniază faptul că pentru studierea cinematicii și mecanismului procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact se impune o programare a experiențelor pentru stabilirea unui model matematic bine fundamentat.

Astfel, **etapele** care au fost abordate în vederea punerii la punct a experimentelor au fost:

- Prelucrarea informațiilor apriorice și eliminarea factorilor parametrilor nesemnificativi;
- Obținerea modelului matematic al obiectului supus cercetării sub forma unei funcții matematice;
- Găsirea unui domeniu optim.

Modelele cercetării preliminare luate în discuție sunt: metoda corelației de rang, analiza dispersională, metoda balanței aleatoare, metode care presupun, în principal, realizarea unor experimentări de selectare a parametrilor și factorilor semnificativi ai procesului.

Metodele cercetării de bază au la bază programele experimentale clasice și programele experimentului activ.

Modelarea statistică s-a realizat în principal în 2(două) etape și anume:

- premodelare;
- modelarea propriu-zisă.

Premodelarea a avut un scop bine determinat care în final a fost atins în 4(patru) etape:

- a) stabilirea variabilelor de stare și a parametrilor procesului;
- b) determinarea unor limite și a unor intervale de variație ale parametrilor procesului;
- c) stabilirea unei erori experimentale precum și a căilor de reducere a acesteia;
- d) precizarea interacțiunilor și a gradului de legătură dintre variabilele de stare și parametrii procesului.

Modelarea statistică propriu-zisă s-a realizat prin experiment activ.

În vederea obținerii unei programări a experimentelor de laborator la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact s-a utilizat metoda experimentului activ, respectiv s-a conceput un program de experimentări factorial complet central compus 2^n unde $n=4$.

7.1.4.2. Prezentarea *Pachetului de Programe* pentru modelare și optimizare statistică experimentală denumit "STATISTIC DATA SYSTEM 2000".

Prelucrarea unor date experimentale prin metode statistice clasice presupune cunoașterea și stăpânirea unor cunoștințe necesare și a unui lung timp de prelucrare dacă aceasta se realizează manual.

Se prezintă o propunere viabilă și rapidă și anume un *Pachet de Programe* de modelare statistică experimentală intitulat generic "STATISTIC DATA SYSTEM 2000". [99], [139].

Este de remarcat faptul că acest program-soft de ansamblu a fost conceput în vederea folosirii cu scop didactic și de cercetare și nu pentru a fi o sursă de venit.

Pachetul de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" permite oricărui cercetător să-și conducă singur cercetările ajutat de un calculator IBM-PC **indiferent de domeniul ingineresc cercetat**.

"STATISTIC DATA SYSTEM 2000" reprezintă un sistem integrat de programe, interactiv și specializat, ușor de folosit și se poate spune foarte prietenos.

Acest pachet de programe permite efectuarea unei analize statistice experimentale, premodelarea, modelarea, optimizarea și conducerea procesului analizat și urmărit.

Scopul principal al *Pachetului de Programe*, "STATISTIC DATA SYSTEM 2000", este acela de-a oferi un suport computerizat în vederea luării unor decizii în cele mai des întâlnite probleme de statistică experimentală.

Pachetul de Programe denumit “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**” a fost conceput în limbajul de programare **Delphi 5**.

Pachetul de Programe, “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**” poate fi un instrument indispensabil în studiul proceselor tehnologice unde numărul factorilor și parametrilor foarte mari ca număr și diversificați implică un număr apreciabil de calcule.

Eroziunea electrică cu rupere de contact este de fapt un procedeu de prelucrare dimensională care prezintă foarte mulți parametri de diverse naturi în comparație de exemplu cu un procedeu de prelucrare mecanică care nu pune atâtea probleme din punct de vedere statistic. [99], [20].

Pentru a putea face totuși față în modelarea de față s-au considerat numai o parte din parametrii existenți ai procedurii de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, dar s-a considerat că aproximarea făcută este mai mult decât suficientă și viabilă.

Pachetul de Programe, “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**”, a fost conceput, respectiv a fost posibil să existe și datorită consultării de către autor a altor programe similare existente. [138], [146], [147].

Totuși în urma studierii programelor de modelare statistică, la care s-a avut acces, [138], [146], [147] s-a constatat că de fapt fiecare dintre acestea încearcă cât de cât o particularizare, respectiv impune o gamă de restricții.

Bineînțeles că nu poate fi posibil în realitate să realizezi un astfel de program de modelare statistică experimentală dacă nu impui cercetărilor și niște restricții.

De exemplu, există, în general, o limitare la 4...10 parametrii de proces deși se știe bine de către cei mai mulți cercetători că, cu cât numărul de parametrii luați în calcul la premodelare, (de exemplu, pentru stabilirea ordinii influenței parametrilor în procesul respectiv funcție de un anumit criteriu de performanță ales), este mai mare cu atât ne apropiem mai mult de o realitate obiectivă.

Fiecare dintre cei care gândesc, concep și proiectează un astfel de soft de modelarea statistică experimentală încearcă să acopere o gamă cât mai mare de posibilități, dar de cele mai multe ori nu este posibil.

De exemplu, din programele studiate cu multă atenție, [138], [146], [147] acestea nu pot să realizeze **un experiment factorial suprasaturat**, deci nu pot determina foarte exact o ordine de influență a unor parametrii de proces folosind de exemplu o metodă statistică cum ar fi metoda balanței aleatoare, corelație de rang sau analiza de corelație, sau dacă realizează acest lucru aproximările făcute sunt discutabile din punct de vedere statistic. [146], [147].

De aceea se revine și se face afirmația că uneori nu se pune accent pe lucrul menționat anterior. Totuși un eventual autor al unui program de modelare statistică, în general, are în gândire

la ce va folosi, cui va folosi și cât de precis trebuie să fie softul său, bineînțeles el, programul, trebuie să fie atât cât trebuie de precis și nu mai mult.

Revenind la *Pachetul de Programe*, “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**”, se poate afirma cu certitudine că este un soft complex care încearcă reușește să modeleze o paletă mult mai mare de parametri decât alte programe similare de firmă care printre altele sunt și foarte scumpe.

Cei care în general doresc să modeleze un proces de prelucrare în care doresc să implementeze și mai mult de 20 parametrii de proces, s-au “altfel” de parametrii, pot folosi cu rezultate bune acest program.

Astfel de procese de prelucrare care oricum ridică pretenții mai deosebite din punct de vedere statistic sunt și procesele de prelucrare neconvenționale și datorită problemelor de natură fundamentală.

Pentru a realiza o premodelare eficientă a procesului amintit s-au luat în calcul un număr de parametrii suficient de mare și acoperitor pentru a putea în final **simula** procesul într-un mod corespunzător și cât mai real.

Din cele menționate mai sus s-au dorit de fapt a spune că este bine să studiezi cât mai multe segmente de programe și pentru completa anumite lipsuri atunci când se concepe ceva similar.

Un număr mare de parametrii (peste 5), în general conduce la un program factorial mai complicat de exemplu: program factorial de ordinul II, ortogonal de ordinul II, rotabil de ordinul II, program simplex centrat, programe simplex reticular, program în derivă.

Acestea sunt relativ greoaie și fac procesul greu de modelat dar se pot folosi.

Literatura de specialitate care prezintă programe de modelare statistică și experimentală nu abordează programe factoriale atât de complexe, spre deosebire de *Pachetul de Programe*, “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**”, care poate realiza acest lucru în mod practic, viabil, atât de precis cât poate permite algoritmul respectiv. [99], [139].

Pachetul de Programe, “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**”, a fost structurat în 6(șase) meniuri principale și anume [99], [139]:

- meniul principal “*Date de Intrare*”, care este destinat preluării datelor de intrare;
- meniul principal “*Date Statistice*”, este destinat efectuării unor calcule statistice preliminare și finale;
- meniul principal “*Premodelare Experimentală*”;
- meniul principal “*Modelare Experimentală*”;
- meniul principal “*Optimizarea Procesului*”;

- meniul principal “*Conducere Proces*”, a fost gândit și conceput pentru a putea realiza conducerea asistată a procesului de prelucrare deci realizarea conectării calculatorului la utilajul de prelucrare, pentru a comanda și controla **On-Line** procesul de prelucrare.

În plus se mai adaugă meniul principal *Exit*.

Descrierea meniurilor principale, a submeniurilor și rolul acestora.

Imaginile construite și expuse prezintă sistematic conținutul *Pachetului de Programe* “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**”.

Astfel, figura 7.5., prezintă o imagine de ansamblu a softului proiectat și realizat.

Figura 7.6., prezintă conținutul meniului “*Date de intrare*” sugerând astfel posibilitățile softului “*Date de intrare*”.

Figura 7.7., scoate în evidență posibilitățile programului de “*Premodelare experimentală*” care oferă utilizatorului de program folosirea celor 4(patru) metode statistice cu care se poate realiza premodelarea experimentală.

Figura 7.8., prezintă grafic meniul respectiv programului “*Date Statistice*” care are în funcțiune toate submeniurile prezentate în imaginea amintită.

Imaginea grafică prezentată în figura 7.9., prezintă modelarea prin experiment clasic respectiv modelarea prin experiment activ, dar și alte programe consacrate de modelare.

După cum se știe optimizarea procesului cu metodele prezentate de literatura de specialitate [99], [139], [20] este foarte importantă. Pe baza rezultatelor obținute se poate realiza o optimizare cu ajutorul câtorva metode de programare prezentate și activate așa cum se observă din figura 7.10.

Meniul principal “Date de Intrare” a fost conceput în vederea facilitării culegerii informațiilor și datelor din proces. El a fost gândit astfel încât acesta permite gestionarea datelor de intrare și de ieșire. Există posibilitatea de a crea, modifica, șterge, datele de intrare și de a afișa și lista atât datele de intrare cât și cele de ieșire.

Utilizatorul pachetului de programe “**STATISTIC DATA SYSTEM 2000**” poate să-și creeze propriile fișiere de date de intrare care ulterior sunt prelucrate de programele de premodelare și modelare.

Datele de intrare sunt introduse de utilizatorul *Pachetului de Programe* "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" printr-un dialog vizual interactiv între utilizator și calculator.

Cel care beneficiază de acest *Pachet de Programe* poate să aibă acces în această fază la datele editate anterior, cât și la rezultatele prelucrării acestor date tastate anterior momentului prezent.

Utilizatorul poate obține și pe suport hârtie datele inițiale, dar și cele finale prin listarea acestora, opțiune facilitată de *Pachetul de Programe*.

Meniul principal "*Date de intrare*" conține submeniurile:

- ◆ *Creare fișier nou;*
- ◆ *Deschide fișier;*
- ◆ *Salvare fișier;*
- ◆ *Listare fișier.*

Meniul principal "*Date Statistice*" a fost gândit și conceput pentru a putea realiza o interpretare primară a datelor experimentale. Subprogramul permite gruparea datelor respectiv determinarea frecvențelor absolute, relative, cumulate absolute, cumulate relative, calculul parametrilor statistici (media, mediana, dispersia, abaterea medie pătratică, calculul și eliminarea erorilor). Aceste analize au la bază datele inițiale introduse în programul care are ca meniu "*Date de intrare*".

Operatorul primește informațiile de care are nevoie pe ecran sau pe suport hârtie având posibilitatea să listeze informația dorită prin selectarea acesteia.

Pe parcursul prelucrării și interpretării datelor tastate calculatorului, programul apelează anumite teste statistice și anume: Testul Student, Testul Fischer-Snedecor, Testul Grups sau Testul Cohram. Programul dispune în baza sa de date anumite fișiere necesare acestor teste.

Programul aferent acestui meniu permite și o sistematizare preliminară obiectivă a datelor experimentale precum și stabilirea și înlăturarea valorilor anormale obținute în vederea folosirii lor la experimentare lucru care se realizează cu criteriile deja cunoscute: R_{\min}^{\max} , Δ (delta), Q.

Aceste criterii utilizează "Testul Student" respectiv distribuțiile specifice pentru a scoate în evidență anumite valori experimentale considerate incorecte și totodată anormale pentru realizarea experimentărilor.

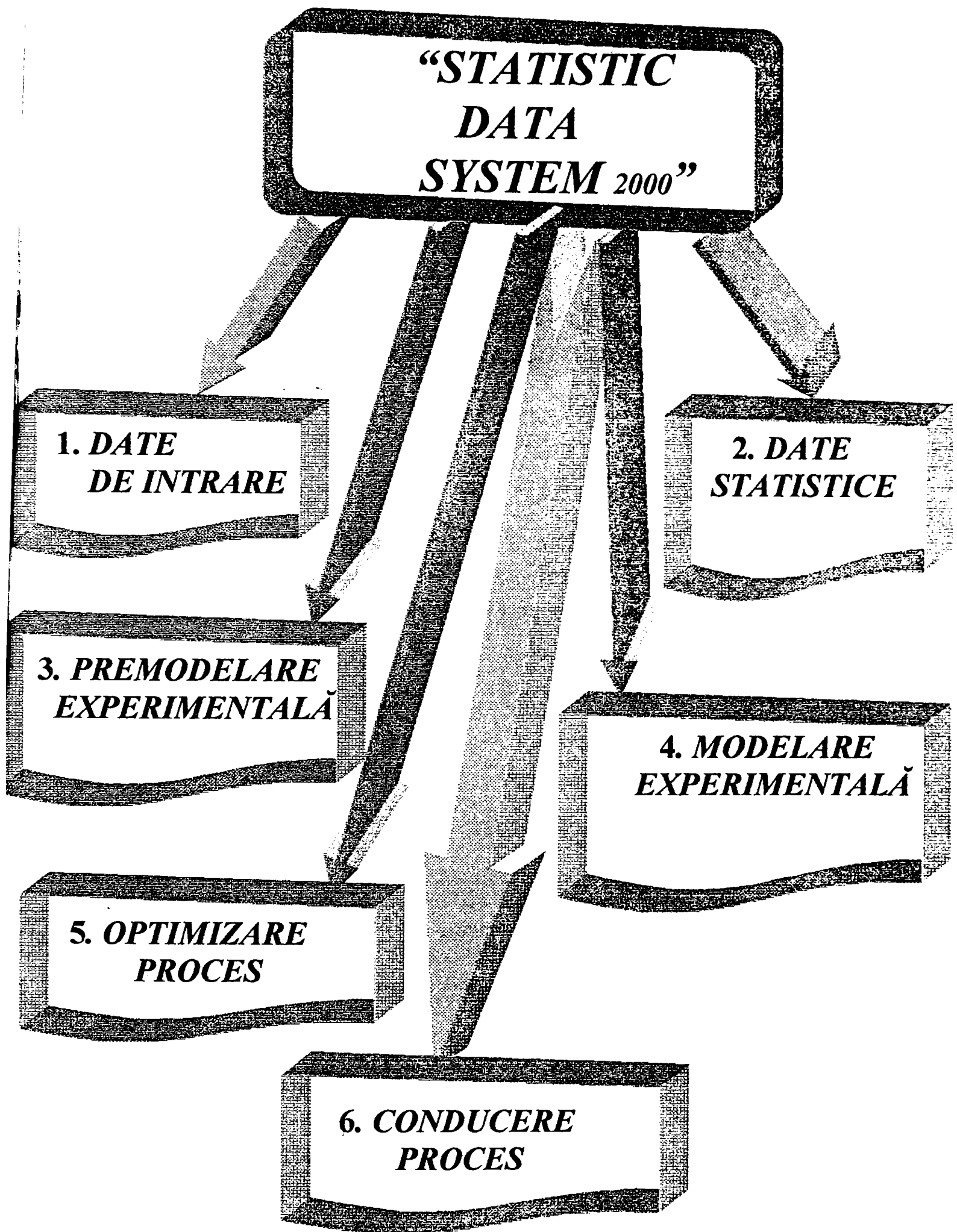


Fig. 7.5.

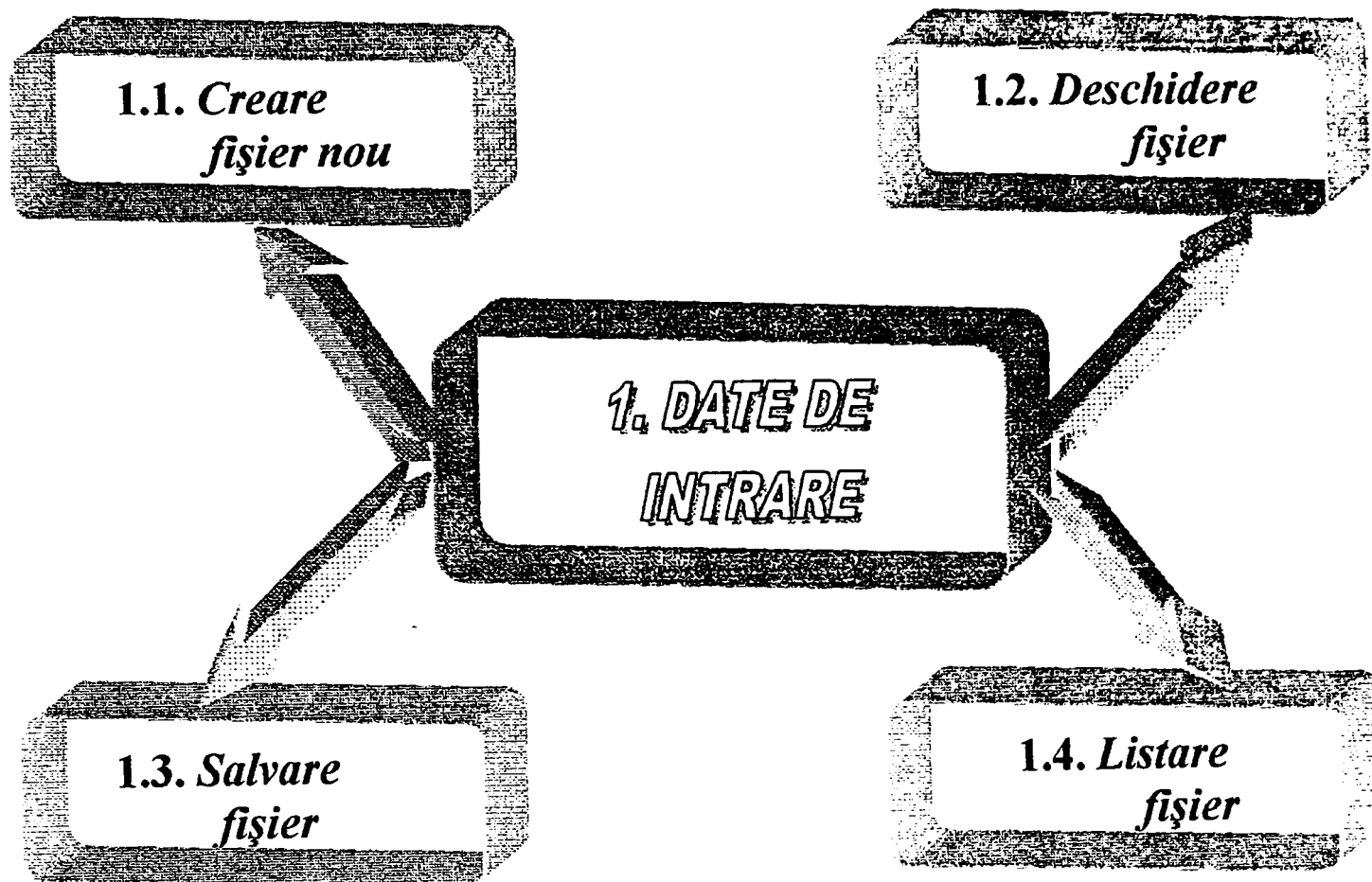


Fig. 7.6.

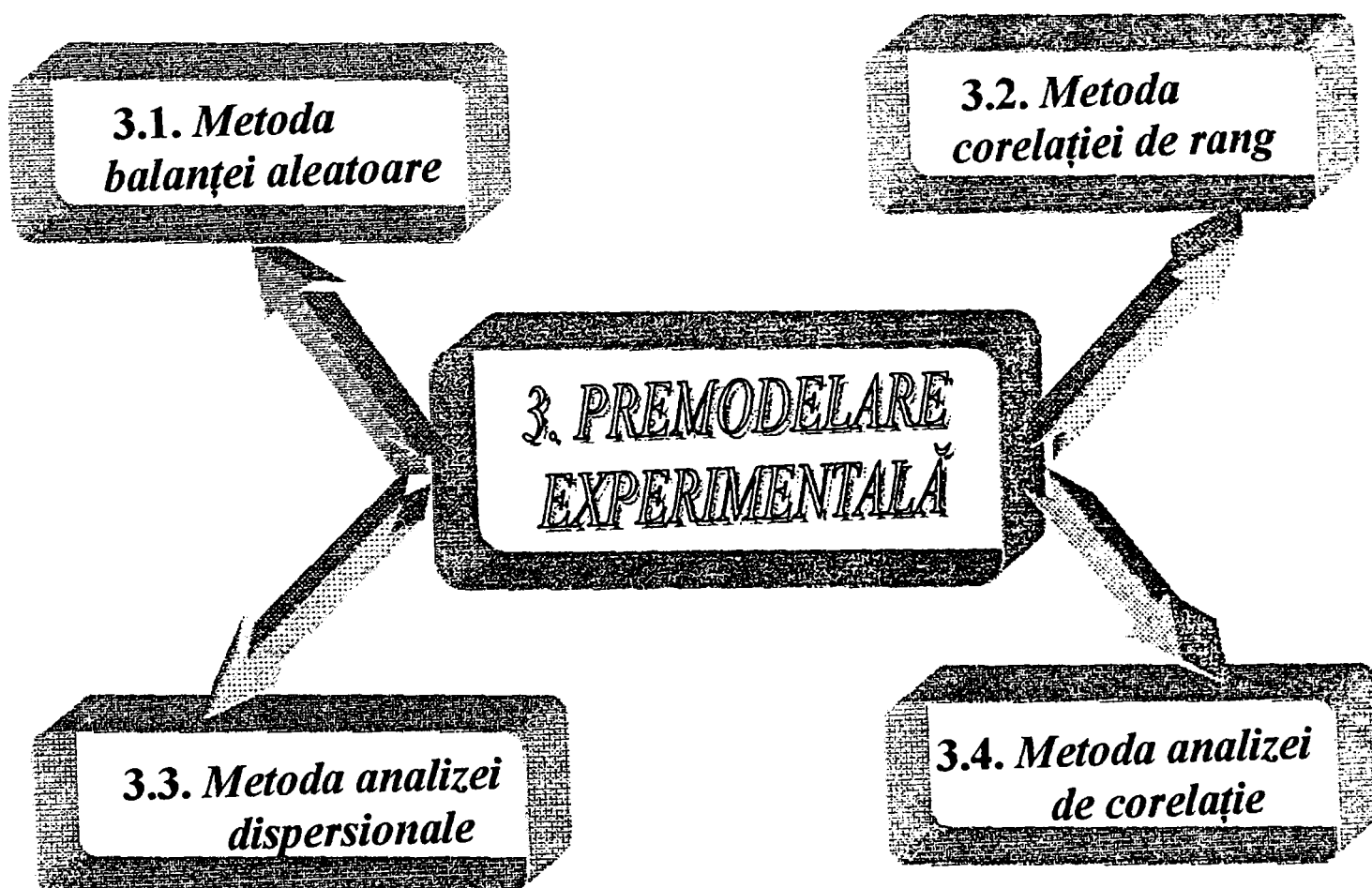


Fig. 7.7.

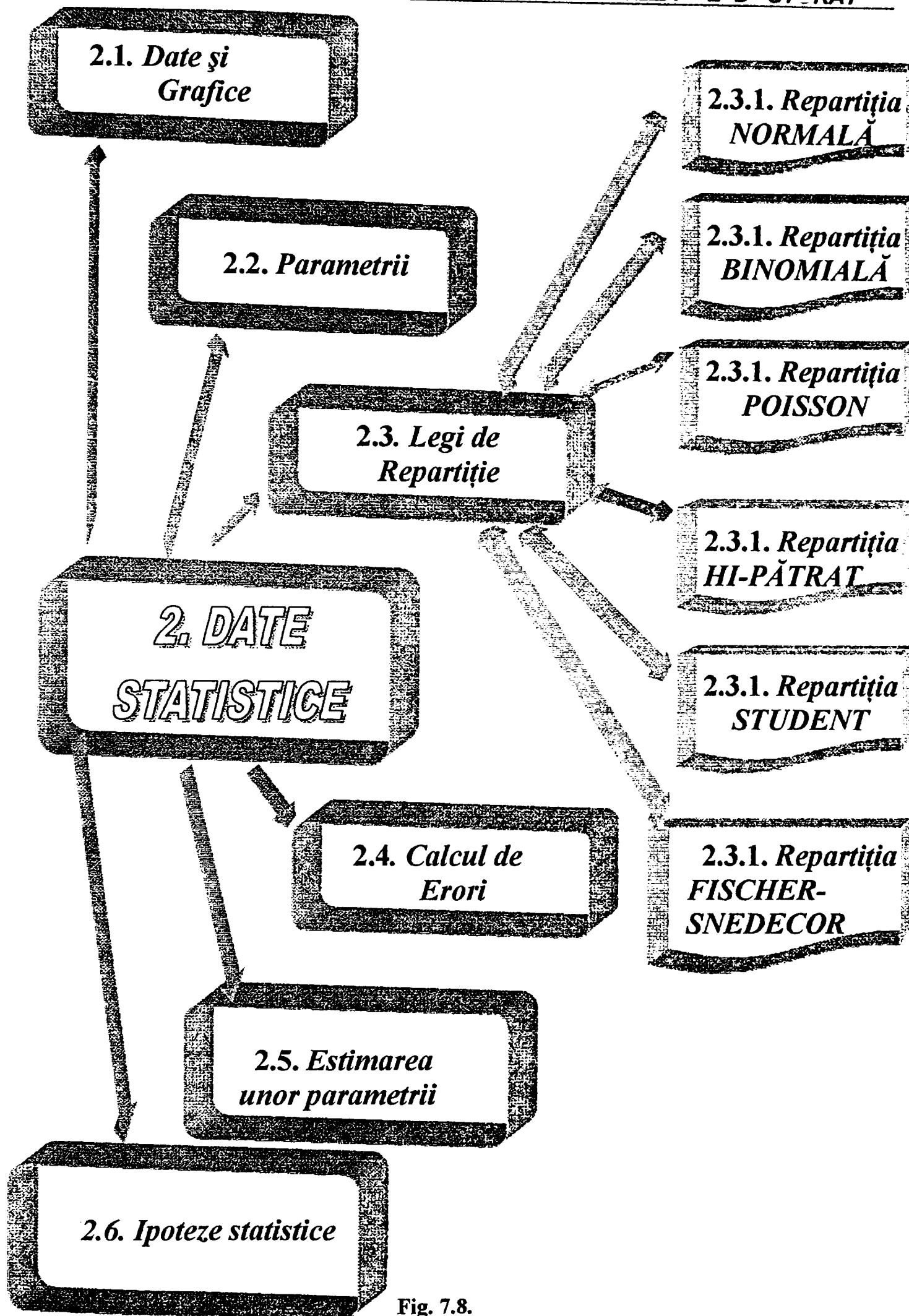


Fig. 7.8.

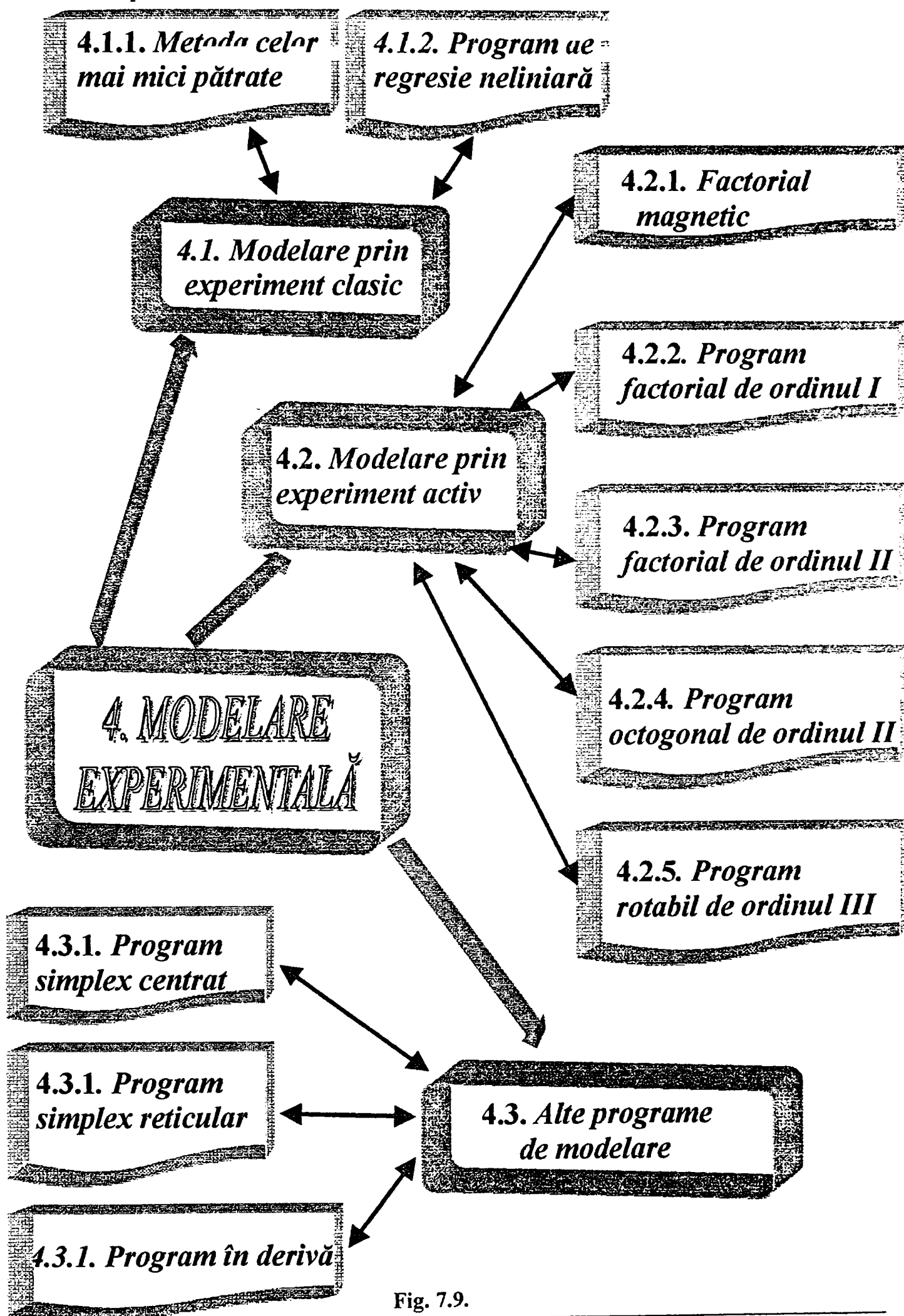


Fig. 7.9.

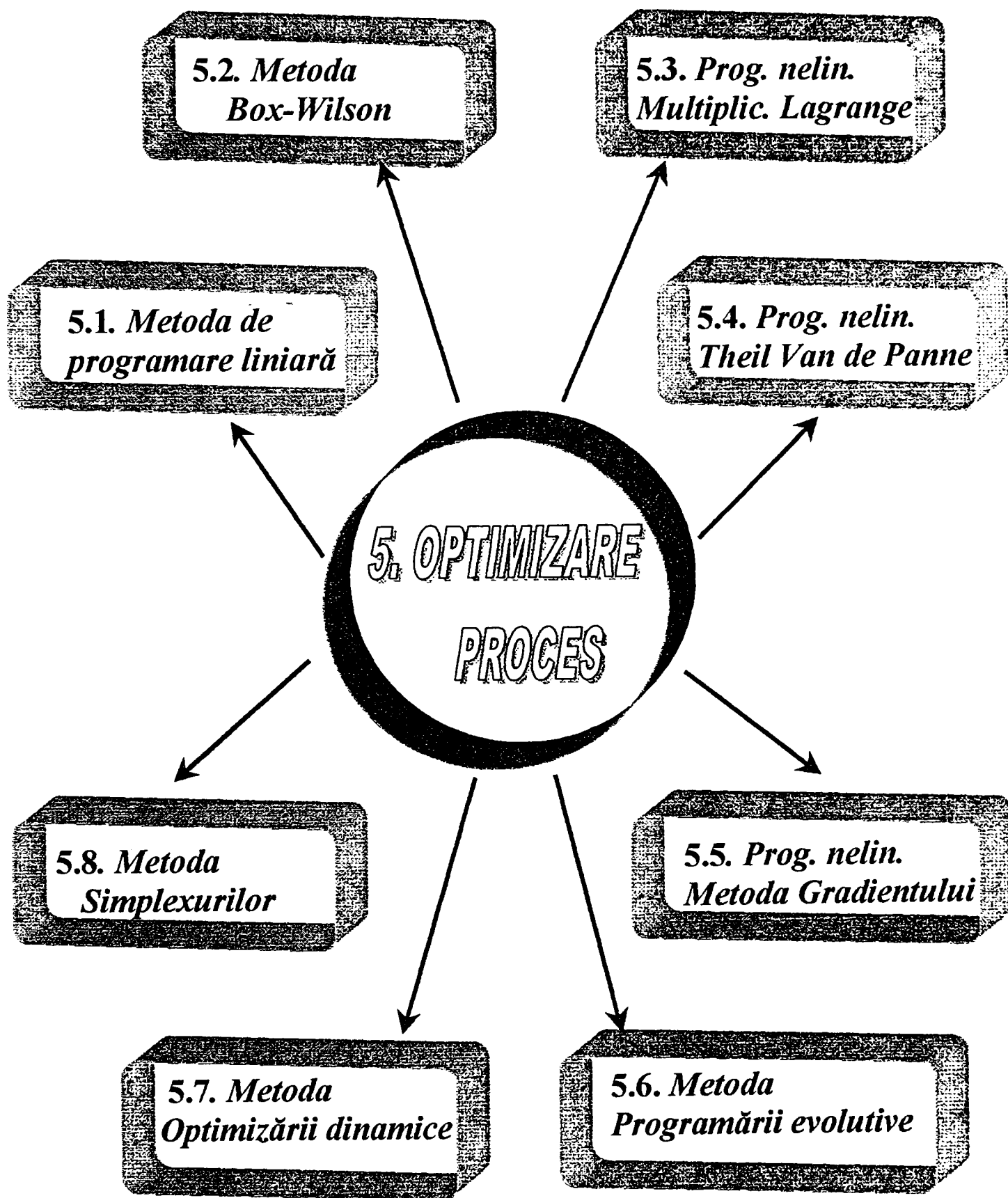


Fig. 7.10.

Meniul principal "Premodelare Experimentală" este compus din submeniurile respectiv din programele următoare:

- ◆ *Metoda balanței aleatoare*, care permite pe baza unui experiment preliminar, să ordoneze parametrii folosiți în proces în ordinea în care aceștia influențează procesul în sine;
- ◆ *Metoda corelației de rang*, care permite culegerea și interpretarea datelor despre procesul prelucrării prin eroziune electrică pe baza unor cercetări și afirmații făcute de literatura de specialitate. Metoda oferă informații cu privire la părerile specialiștilor și anume dacă părerile lor concordă sau nu, dacă opiniile lor diferă sau nu.
- ◆ *Metoda analizei dispersionale* unde se testează efectele produse de anumite variații a factorilor aleatori și de efectele produse de factorii sistematici. În cele din urmă metoda analizei dispersionale separă efectele amintite.
- ◆ *Metoda analizei de corelație* este o metodă cu care se poate determina legăturile dintre diferiții factori și variabilele de stare. metoda implementată în acest *Pachet de Programe* permite o selectare a factorilor și parametrilor cu influențe semnificative:

Meniul principal "Modelare experimentală" cuprinde programele aferente următoarelor posibilități:

- a) *Modelarea prin experiment clasic* – oferă posibilitățile următoare în acest *Pachet de Programe*:
Metoda celor mai mici pătrate (MCMMP) unde modele pot fi liniare, logaritmice, exponențiale și *Regresia neliniară* cu ajutorul polinoamelor algebrice, polinoamelor trigonometrice și polinoamelor Cebîșev.
- b) *Modelarea prin experiment activ* – cuprinde o serie de programe pentru experiment factorial, pentru experimente de ordinul I, II și III. Programul pentru experiment factorial de ordinul II (FACT2-2N) are la bază programul pentru experiment factorial de ordinul I (FACT1-2N).
- c) *Modelarea prin alte programe* – face referire la programarea experiențelor în condiții de derivă și programe de experimentări simplex.

Meniul principal "Optimizarea Procesului" oferă posibilitatea utilizatorului acestui *Pachet de Programe* interactiv să aleagă una sau mai multe din metodele de optimizare ca de exemplu:

- *Metoda multiplicatorilor lui Lagrange*;
- *Metoda Box-Wilson*;
- *Metoda Theil Van de Panne*;
- *Metoda gradientului*;
- *Metoda de programare evolutivă*;

- *Metoda optimizării dinamice;*
- *Metoda simplexurilor.*

Funcție de felul optimizării cu sau fără restricții utilizatorul programului major "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" poate alege metoda de optimizare dorită din cele anterior prezentate.

Meniul principal "Conducere Proces" a fost și conceput pentru ca în urma rezultatelor obținute cu *Pachetul de Programe* prezentat să se realizeze o conducere asistată a procesului de prelucrare ON-LINE deci în mod practic realizarea conectării calculatorului cu mașina de prelucrare sau stansul folosit. Cu ajutorul programelor Pascal aferente meniului principal "Conducere proces", precum și folosind datele obținute în urma rulării și interpretării programului experimental, se poate comanda și controla ON-LINE procesul de prelucrare.

Deci se poate afirma că *Pachetul de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000"* reprezintă totuși *un punct de vedere*.

Pachetul de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" oferă posibilitatea utilizatorului mai puțin familiarizat cu modelarea statistică experimentală să și traseze diagramele dorite care au ca variabile parametri folosiți în proces dar și variabile de stare folosite.

În vederea conducerii la bun sfârșit e experimentărilor de laborator propuse și în vederea trasării și interpretării rezultatelor s-au folosit succesiv *Pachetul de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000"* și *Pachetul de Programe "STATGRAPHICS" versiunea 6.1. cu licență* pentru realizarea unui experiment factorial ortogonal, complet și central compus 2^n unde $n=4$.

7.2. Programarea asistată a cercetării experimentale la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și aliajelor sale.

În programarea experimentelor de laborator la prelucrarea prin eroziune cu rupere de contact s-au parcurs pe rând toate etapele cercetării experimentale prezentate în paragrafele anterioare în cadrul acestui capitol.

Se poate spune totuși pe scurt că au fost definite variabilele de stare și parametri de proces care au interesat până la urmă și s-a realizat o premodelare a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact prin stabilirea unei ordini cât mai exacte a parametrilor luați în calcul

care au o influență semnificativă asupra procesului de prelucrare amintit folosind metoda *balanței aleatoare* precum și *analiza dispersională*.

În general metodele empirice utilizate, în special experimentul clasic, s-au evidențiat printr-un mod laborios de tratare a problemei și o eficacitate scăzută. Problema se poate corecta când se utilizează experimentul activ atunci când se utilizează programarea statistică experimentală.

Programul de experimentări utilizat a fost realizat pe baza unui experiment activ și astfel s-au obținut ecuațiile de regresie și condițiile de realizare a valorii optime, fără a fi necesară efectuarea unui număr mare de experimentări.

Funcția obiectiv generală a fost cea cunoscută:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n); \quad (7.7)$$

unde s-au determinat nivelele factorilor de influență $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ pentru care funcția are valori maxime.

Datorită complexității fenomenului, datorită unui număr relativ mare de parametri luați inițial în calcul (10 parametri inițial) funcția obiectiv nu a putut fi determinată exact. De aceea în general, ca și în cazul de față modelul real (funcția obiectiv) este înlocuit (înlocuită) cu un model statistic, rezultat prin dezvoltarea în serie Taylor, în jurul unui punct care a fost considerat a fi convenabil, care este practic centrul experimentului.

Funcția folosită inițial a fost de forma:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \dots \quad (7.8)$$

unde $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ sunt coeficienți reali ai ecuației, iar variabilele (x) sunt valorile factorilor.

Valorile coeficienților (β_0) care de altfel sunt valori reale se înlocuiesc cu valorile lor calculate.

Factorii x_i, x_j nu participă la construcția modelului cu valori concrete ci cu valori codificate.

Pentru fiecare variabilă (4 la număr în final) s-au determinat anumite nivele de bază x_{0n} care sunt de fapt puncte (coordonate) de plecare în cadrul experimentului. În continuare se stabilesc intervale de variație Δx_n de unde rezultă o limită maximă și una minimă.

Valoarea codificată a factorilor este α :

$$\alpha = \frac{x_n - x_{on}}{\Delta x_n} \quad (7.9.)$$

Nivelul superior, adică limită superioară este notată cu (+1), iar minimumul cu (-1). Revenind la multitudinea de parametri care pot fi luați în evidență s-a stabilit totuși că în procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact sunt suficienți "la început" un număr de 8(opt) parametri care pot influența semnificativ procesul.

7.3. Cercetări experimentale.

7.3.1. Premodelarea experimentală.

Metoda bilanțului aleator (*metoda balanței aleatoare*) ca și metodă de premodelare statistică experimentală a fost folosită pentru determinarea unei ordini de influență cât mai exactă a parametrilor de proces luați în calculul funcției de criteriu de performanță ales.

Acești parametri luați în discuție sunt într-o ordine oarecare:

- 1) Viteza de avans v_{av} [mm/min];
- 2) Debitul de lichid Q_l [l/min];
- 3) Viteza relativă v_r [m/s];
- 4) Intensitatea curentului electric: I [A];
- 5) Materialul obiectului de prelucrat;
- 6) Materialul obiectului de transfer;
- 7) Polaritatea prelucrării;

Este foarte important de subliniat faptul că viteza de avans v_{av} [mm/min] este dependentă de presiunea specifică din proces.

Totodată în cadrul cercetării s-au stabilit variabilele de stare (funcțiile obiectiv) și anume:

- 1) Productivitatea prelucrării: Q_p [mm³/min];
- 2) Uzura relativă: γ [%];
- 3) Calitatea suprafeței prelucrate exprimată prin parametrul de rugozitate R_a [μm].

Astfel, cu ajutorul *Pachetului de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000"* s-a determinat această ordine de influență asupra procesului a parametrilor enumerați anterior.

Metoda permite de fapt deducerea diferitelor combinații ale variabilelor independente asupra criteriilor de performanță pe baza unei singure serii de experimentări și în final ordonarea parametrilor după amplitudinea efectului produs.

Etapele parcurse de programul de calcul aferent metodei și inclus în *Pachetul de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000"* au fost:

- ◆ Calculul mediei valorilor criteriului de performanță, pentru fiecare nivel al variabilei și media mediilor acestora;
- ◆ Calculul domeniului de dispersie al valorilor medii și a corecției pentru fiecare nivel al variabilei (parametrului) cu dispersia maximă;
- ◆ Eliminarea efectului variabilei (parametrului) cu cea mai mare influență asupra criteriului de performanță ales și reluarea calcului cu valorile corectate ale criteriului de performanță pentru celelalte variabile.

Pentru a putea introduce datele de care programul a avut nevoie au fost necesare câteva experimente preliminare.

Pentru criteriul de performanță ales a fost *Productivitate Prelucrării Q_p [mm³/min]*, ordonarea parametrilor de influență a fost după amplitudinea efectului produs următoarea:

- 1) **Intensitatea câmpului electric I [A];**
- 2) **Debitul de lichid Q_1 [l/min];**
- 3) **Viteza relativă v_r [m/s];**
- 4) **Viteza de avans v_{av} [mm/min];**
- 5) **Materialul obiectului de transfer;**
- 6) **Materialul obiectului de prelucrat;**
- 7) **Polaritatea prelucrării POL1 / POL2.**

Programul de calcul modelare și optimizare statistică experimentală din cadrul *Pachetului de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000"* are posibilitatea să ordoneze parametrii luați în discuție și funcție de celelalte criterii de performanță. De asemenea, se poate afirma că folosind alte criterii de performanță se obțin ordonări diferite ale parametrilor luați în discuție.

Modelarea matematică cu *metoda balanței aleatoare* permite reducerea timpului afectat calculelor, dă posibilitatea unei analize corecte *corelate* a variabilelor de influență și creează premisele de stabilire a unui model experimental variabil al procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu activare magnetică.

După obținerea ordinii de influență a parametrilor folosiți s-a trecut practic la realizarea modelului respectiv și s-a construit matricea program a experimentării trecându-se la un experiment factorial de ordinul I. Acesta nu a corespuns din punct de vedere statistic cu alte cuvinte *modelul obținut nu a fost adecvat*.

7.3.2. Modelarea experimentală.

Atunci conform teoriei statisticii matematice s-a trecut la o matrice program a experimentării care caracterizează un experiment factorial ortogonal complet central compus de ordinul al II-lea 2^n unde $n=4$ (patru) reprezintă numărul de parametri. (**Intensitatea câmpului electric I [A]; Debitul de lichid Q_1 [l/min]; Viteza relativă v_r [m/s]; Viteza de avans v_{av} [mm/min];**)

Se cunoaște faptul că experimentul este factorial complet în cazul în care sunt incluse toate combinațiile posibile ale nivelelor factorilor.

Astfel, primii 4 parametri enumerați anterior au fost considerați a fi relevanți și de primă importanță în realizarea matricii de experimentare.

Interpretarea rezultatelor se va face după ce vor fi făcute câte 3(trei) determinări paralele pentru fiecare situație în parte.

Programul de experimentări așa cum s-a dovedit ulterior a acoperit cu prisosință gama de prelucrări necesară obținerii unor concluzii pertinente și viabile.

Modelul experimental prezentat reprezintă un punct de vedere verificat științific din mai multe părți și bine fundamentat atât teoretic cât și experimental.

S-a folosit un experiment factorial ortogonal, complet și central compus de ordinul II având la bază un experiment factorial complet 2^4 , respectiv câte două măsurări pe fiecare axă corespunzător fiecărui factor de influență.

Acest tip de experiment reprezintă un experiment central compus **standard** în accepțiunea programului de modelare statistică experimentală.

De reținut și de subliniat că s-a apelat la un experiment factorial complet central compus deoarece un experiment factorial de ordinul I nu a furnizat estimări ale rezultatelor cu o precizie mulțumitoare. [139].

Astfel:

Experimentul factorial ortogonal, complet și central compus de ordinul al II-lea a abordat prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a unor materiale metalice de tipul *aluminu* atunci când obiectul de transfer a fost un disc de oțel iar mediul de lucru – apa industrială, “a fost trimis” în spațiul de lucru prin jet dirijat lateral.

De remarcat este faptul că în cadrul experimentelor rezultatele obținute au fost foarte bune, se poate spune chiar de excepție.

Pentru programul experimental de natură factorială s-a construit matricea de experimentare, tabele specifice unor astfel de programe factoriale, (tabelele 7.1. – 7.5.), care conțin factorii de influență independenți și funcțiile obiectiv cu valori ale acestora fizice și codificate, coeficienții de regresie ai funcțiilor obiectiv cu valori fizice și codificate, precum și efectele standard estimate pentru funcțiile obiectiv exprimate prin valori fizice.

Tabelul 7.1.

S.D.S. software		"STATISTIC DATA SYSTEM 2000" The "Lucian Blaga" University of Sibiu Romania Copyright © All rights reserved. Registered O.R.D.A. Trade Mark - RO - ®		
Experiment factorial complet central compus ortogonal de ordinul II Coeficienți de regresie ai funcțiilor obiectiv – valori fizice				
Coeficienți de regresie		Q_p [mm ³ /min]	γ [%]	Ra [μm]
Constant		-70,3709	106,916	3,95059
A : I		1,43287	-0,379737	-0,0259876
B : Q_l		0,0596657	0,0140315	0,0517245
C : v_r		16,9022	-24,5798	0,0765308
D : v_{av}		5,40882E-4	-7,87455E-5	1,22249E-4
A · B		3,83783E-4	9,61718E-4	-2,24961E-4
A · C		0,0178066	-0,158309	-1,21528E-3
A · D		3,86849E-6	-2,39891E-5	-2,71267E-7
B · C		-0,0303243	0,0149026	-6,07394E-3
B · D		1,57433E-6	-1,27138E-5	2,75088E-8

C · D		3,86455E-5	-1,03564E-4	-1,70898E-5
A · A		-0,0263626	0,0327919	9,46772E-4
B · B		2,03699E-4	1,45381E-5	-2,40354E-6
C · C		-0,883913	1,88623	0,0520814
D · D		-3,54583E-8	6,60853E-8	1,00999E-9

Tabelul 7.2.

<p>S.D.S. software</p> <p>"STATISTIC DATA SYSTEM 2000" The "Lucian Blaga" University of Sibiu Romania Copyright © All rights reserved. Registered O.R.D.A. Trade Mark - RO - ®</p>			
<p>Experiment factorial complet central compus ortogonal de ordinul II Efectele estimate pentru funcțiile obiectiv – valori fizice</p>			
Coeficienți de regresie	Q_p [mm ³ /min]	γ [%]	Ra [μm]
Average	26,4934±1,55367	5,1717±5,57302	7,04912±0,171395
A : I	1,28628±1,35103	11,0353±4,84616	0,227606±0,14904 1
B : Q ₁	-7,22334±1,42171	1,90842±5,0997	0,172968±0,15683 8
C : v _r	14,5134±1,22067	-12,1176±4,37855	0,975±0,13466
D : v _{av}	4,35621±1,37026	-12,9409±4,91512	0,198533±0,15116 2
A · B	0,490475±1,49501	1,22908±5,3626	-0,2875±0,164924
A · C	1,28207±1,49501	-11,3983±5,3626	-0,0875±0,164924
A · D	0,8913±1,49501	-5,5271±5,3626	-0,0625±0,164924
B · C	-4,30605±1,49501	2,11618±5,3626	-0,8625±0,164924
B · D	0,715375±1,49501	-5,77715±5,3626	0,0125±0,164924
C · D	0,989325±1,49501	-2,65125±5,3626	-0,4375±0,164924
A · A	-17,083±2,13968	21,2491±7,67505	0,613508±0,23604 2
B · B	0,513422±0,159428	0,0366432±0,57187	-6,05813E- 3±0,0175875
C · C	-7,0713±1,29987	15,0898±4,66263	0,416651±0,14339 7
D · D	-2,90474±0,695891	5,4137±2,49616	0,0827387±0,0767 681
<p>Eroarea standard estimată pentru eroarea totală: $t = 0.220156$</p>			

Tabelul 7.3.

S.D.S. software *"STATISTIC DATA SYSTEM 2000"*
The "Lucian Blaga" University of Sibiu Romania
Copyright © All rights reserved.
Registered O.R.D.A. Trade Mark - RO - ®

Experiment factorial complet central compus ortogonal de ordinul II
Coeficienți de regresie ai funcțiilor obiectiv – valori codificate

Coeficienți de regresie	Q_p [mm ³ /min]	γ [%]	Ra [μm]
Constant	26,4763	5,18176	7,0499
A : I	0,651637	5,50507	0,11345
B : Q_1	-3,6118	0,953837	0,0864701
C : v_r	7,25672		0,4875
D : v_{av}	2,17774	-6,47103	0,0992759
A · B	0,245238	0,614738	-0,14375
A · C	0,641037	-5,69914	-0,04375
A · D	0,44565	-2,76355	-0,03125
B · C	-2,15302	1,05809	-0,43125
B · D	0,357687	-2,88857	6,25E-3
C · D	0,494663	-1,32563	-0,21875
A · A	-8,52285	10,6072	0,305842
B · B	0,256961	0,0183357	-3,03352E-3
C · C	-3,53375	7,5457	0,208256
D · D	-1,45119	2,70677	0,041321

Tabelul 7.4.

S.D.S. software *"STATISTIC DATA SYSTEM 2000"*
The "Lucian Blaga" University of Sibiu Romania
Copyright © All rights reserved.
Registered O.R.D.A. Trade Mark - RO - ®

Experiment factorial complet central compus ortogonal de ordinul II
DATE EXPERIMENTALE – valori fizice

Nr. crt.	I [A]	Q_1 [l/min]	v_r [m/s]	v_{av} [mm/min]	Q_p [mm ³ /min]	γ [%]	Ra [μm]
1.	150	3.53	24.6	28.14	1673.62	4.72	28.1
2.	200	3.53	24.6	28.14	1879.66	5.84	29.7
3.	150	8.9	24.6	28.14	1721.81	3.47	23.2
4.	200	8.9	24.6	28.14	1907.74	4.25	27.5
5.	150	3.53	40	28.14	1775.48	4.58	30.2
6.	200	3.53	40	28.14	2010.32	4.82	32.4
7.	150	8.9	40	28.14	1794.03	3.15	29.7
8.	200	8.9	40	28.14	2148.54	3.54	30.6
9.	150	3.53	24.6	43	1835.88	4.87	33.1
10.	200	3.53	24.6	43	2106.34	5.93	34.8
11.	150	8.9	24.6	43	1989.07	4.12	32.6

S.D.S. software *"STATISTIC DATA SYSTEM 2000"*
The "Lucian Blaga" University of Sibiu Romania
Copyright © All rights reserved.
Registered O.R.D.A. Trade Mark - RO - ®

Experiment factorial complet central compus ortogonal de ordinul II

DATE EXPERIMENTALE – valori fizice								
Nr. crt.	I [A]	Q _l [l/min]	V _r [m/s]	V _{av} [mm/min]	Q _p [mm ³ /min]	γ [%]	Ra [μm]	
12.	200	8.9	246	43	2457.20	5.71	35.1	
13.	150	3.53	40	43	1914.39	4.75	36.4	
14.	200	3.53	40	43	1943.33	6.14	39.7	
15.	150	8.9	40	43	2007.69	3.59	25.8	
16.	200	8.9	40	43	2627.2	5.52	33.6	
17.	100	5	12.5	37	1625.24	4.25	25.6	
18.	175	12.2	75	37	1958.24	5.12	26.89	
19.	175	6.2	34.2	37	1999.112	3.49	29.45	
20.	175	6.2	34.2	37	1452.145	5.02	31.21	
21.	175	6.2	34.2	37	1857.49	3.99	29.49	
22.	175	6.2	34.2	37	2000.212	3.56	28.69	
23.	175	6.2	34.2	37	1945.89	4.65	29.97	
24.	175	6.2	34.2	28.14	1758.46	4.56	32.45	
25.	175	6.2	34.2	37	1987.12	5.132	33.66	
26.	175	6.2	34.2	37	2325.158	3.69	32.89	

Tabelul 7.5.

S.D.S. software *"STATISTIC DATA SYSTEM 2000"*
The "Lucian Blaga" University of Sibiu Romania
Copyright © All rights reserved.
Registered O.R.D.A. Trade Mark - RO - ®

Experiment factorial complet central compus ortogonal de ordinul II

DATE EXPERIMENTALE – valori codificate								
Nr. crt.	I [A]	Q _l [l/min]	V _r [m/s]	V _{av} [mm/min]	Q _p [mm ³ /min]	γ [%]	Ra [μm]	
1.	-1,00	-1,00	-1	-1,000	1673.62	4.72	28.1	
2.	1,00	-1,00	-1	-1,000	1879.66	5.84	29.7	
3.	-1,00	1,00	-1	-1,000	1721.81	3.47	23.2	
4.	1,00	1,00	-1	-1,000	1907.74	4.25	27.5	
5.	-1,00	-1,00	1	-1,000	1775.48	4.58	30.2	
6.	1,00	-1,00	1	-1,000	2010.32	4.82	32.4	
7.	-1,00	1,00	1	-1,000	1794.03	3.15	29.7	
8.	1,00	1,00	1	-1,000	2148.54	3.54	30.6	
9.	-1,00	-1,00	-1	1,000	1835.88	4.87	33.1	

S.D.S. software		"STATISTIC DATA SYSTEM 2000" The "Lucian Blaga" University of Sibiu Romania Copyright © All rights reserved. Registered O.R.D.A. Trade Mark - RO - ®						
Experiment factorial complet central compus ortogonal de ordinul II								
DATE EXPERIMENTALE – valori codificate								
Nr. crt.	I [A]	Q ₁ [l/min]	V _r [m/s]	V _{av} [mm/min]	Q _p [mm ³ /min]	γ [%]	Ra [μm]	
10.	1,00	-1,00	-1	1,000	2106.34	5.93	34.8	
11.	-1,00	1,00	-1	1,000	1989.07	4.12	32.6	
12.	1,00	1,00	-1	1,000	2457.20	5.71	35.1	
13.	-1,00	-1,00	1	1,000	1914.39	4.75	36.4	
14.	1,00	-1,00	1	1,000	1943.33	6.14	39.7	
15.	-1,00	1,00	1	1,000	2007.69	3.59	25.8	
16.	1,00	1,00	1	1,000	2627.2	5.52	33.6	
17.	-1,22	0,00	0	0,000	1625.24	4.25	25.6	
18.	1,67	0,00	0	0,000	1958.24	5.12	26.89	
19.	0,00	-1,34	0	0,000	1999.112	3.49	29.45	
20.	0,00	10,15	0	0,000	1452.145	5.02	31.21	
21.	0,00	0,00	-2	0,000	1857.49	3.99	29.49	
22.	0,00	0,00	2	0,000	2000.212	3.56	28.69	
23.	0,00	0,00	0	-1,375	1945.89	4.65	29.97	
24.	0,00	0,00	0	3,500	1758.46	4.56	32.45	
25.	0,00	0,00	0	0,000	1987.12	5.132	33.66	
26.	0,00	0,00	0	0,000	2325.158	3.69	32.89	

Este de subliniat faptul că efectele standard estimate reprezintă diferența mediilor valorilor funcțiilor obiectiv respective când factorii de influență se află pe nivelul inferior și superior.

Efectele standard semnificative depășesc o anumită linie verticală denumită linia "zero" în statistica experimentală.

Pentru toate situațiile în care unul sau mai mulți factori de influență nu apar în reprezentările grafice de profil, acestea sunt considerați a se afla pe nivelul central al experimentului.

În urma analizei statistice experimentale s-au determinat și funcțiile obiectiv pentru fiecare experiment factorial în parte. (tabelul 7.6).

Ecuția generală a funcției obiectiv a fost în cele din urmă de forma:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2$$

Tabelul 7.6.

<i>Experiment factorial complet central compus de ordinul II</i>	
<i>Ecuatiile generale ale funcțiilor obiectiv</i>	
Q_p [mm ³ /mi n]	$Q_p = -70,3709 + 1,43287 \cdot I + 0,0596657 \cdot Q_1 + 16,9022 \cdot v_r + (5,40882 \cdot 10^{-4}) \cdot v_{av} + (3,83783 \cdot 10^{-4}) \cdot I \cdot Q_1 + 0,0178066 \cdot I \cdot v_r + (3,86849 \cdot 10^{-6}) \cdot I \cdot v_{av} + (-0,0303243) \cdot Q_1 \cdot v_r + (1,57433 \cdot 10^{-6}) \cdot Q_1 \cdot v_{av} + (3,86455 \cdot 10^{-5}) \cdot v_r \cdot v_{av} + (-0,0263626) \cdot I^2 + (2,03699 \cdot 10^{-4}) \cdot Q_1^2 + (-0,883913) \cdot v_r^2 + (-3,54583 \cdot 10^{-8}) \cdot v_{av}^2$
γ [%]	$\gamma = 106,916 + (-0,379737) \cdot I + 0,0140315 \cdot Q_1 + (-24,5798) \cdot v_r + (-7,87455 \cdot 10^{-5}) \cdot v_{av} + (9,61718 \cdot 10^{-4}) \cdot I \cdot Q_1 + (-0,158309) \cdot I \cdot v_r + (-2,39891 \cdot 10^{-5}) \cdot I \cdot v_{av} + 0,0149026 \cdot Q_1 \cdot v_r + (-1,27138 \cdot 10^{-5}) \cdot Q_1 \cdot v_{av} + (-1,03564 \cdot 10^{-4}) \cdot v_r \cdot v_{av} + 0,0327919 \cdot I^2 + (1,45381 \cdot 10^{-5}) \cdot Q_1^2 + 1,88623 \cdot v_r^2 + (6,60853 \cdot 10^{-8}) \cdot v_{av}^2$
R_a [μm]	$R_a = 3,95059 + (-0,0259876) \cdot I + (0,0517245) \cdot Q_1 + 0,0765308 \cdot v_r + (1,22249 \cdot 10^{-4}) \cdot v_{av} + (-2,2496 \cdot 10^{-4}) \cdot I \cdot Q_1 + (-1,21528 \cdot 10^{-3}) \cdot I \cdot v_r + (-2,71267 \cdot 10^{-7}) \cdot I \cdot v_{av} + (-6,0739410^{-3}) \cdot Q_1 \cdot v_r + (2,75088 \cdot 10^{-8}) \cdot Q_1 \cdot v_{av} + (-1,70898 \cdot 10^{-5}) \cdot v_r \cdot v_{av} + (9,46772 \cdot 10^{-4}) \cdot I^2 + (-2,40354 \cdot 10^{-6}) \cdot Q_1^2 + 0,0520814 \cdot v_r^2 + (1,00999 \cdot 10^{-9}) \cdot v_{av}^2$

7.3.3. Rezultate experimentale.

Analiza statistică experimentală efectuată și prezentată anterior a condus la obținerea cu ajutorul pachetului de programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" a rezultatelor experimentale cuantificate prin curbe de variație spațiale a funcțiilor obiectiv analizate, optimizate statistic, precum și trasarea diagramelor de estimare a efectelor standard dar și reprezentarea grafică a raportului dintre valorile fizice măsurate și valorile fizice estimate.

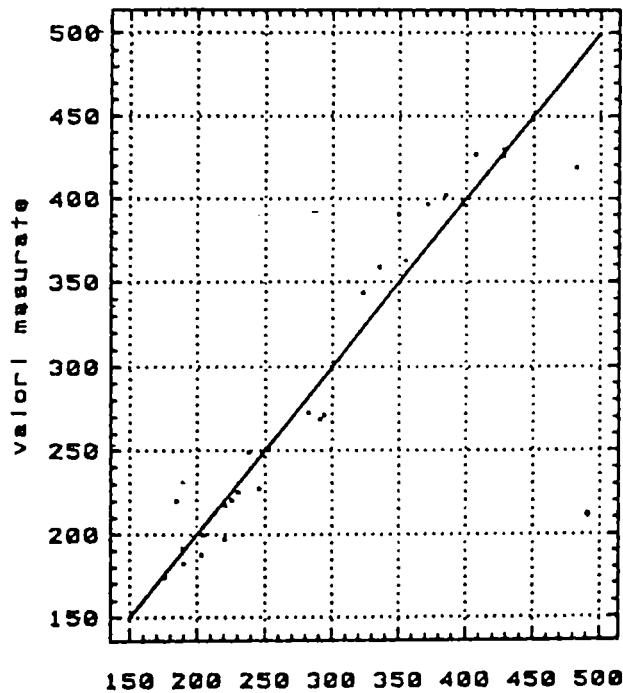
Reprezentările spațiale a funcțiilor obiectiv pentru programul experimental au furnizat mai ales anumite date tehnologice de interes deosebit care au fost transpuse în imagini grafice sub forma unor "cuburi tehnologice".

Imaginile astfel create oferă posibilitatea unui tehnolog de proces să găsească o anumită valoare a funcției obiectiv analizate astfel încât procesul de prelevare de material respectiv debitare la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact să fie cel dorit sau altfel spus să se obțină ceea ce se dorește din punct de vedere al parametrilor de proces tehnologic, cum ar

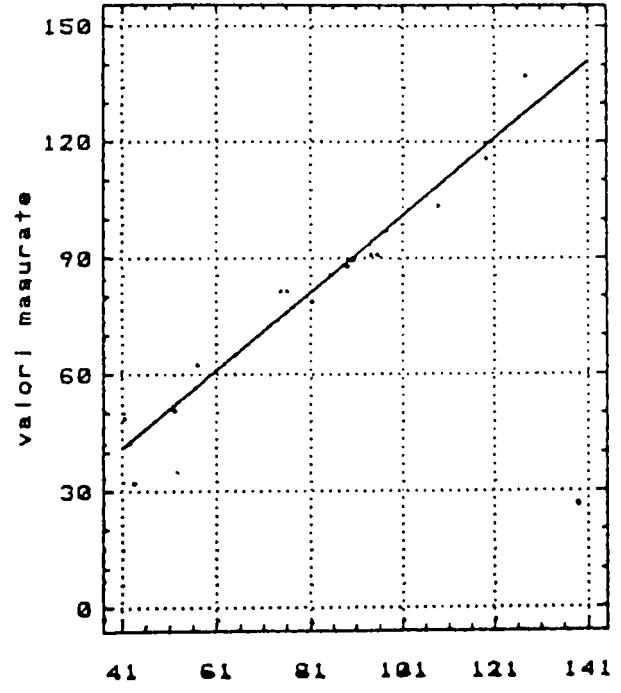
fi o anumita productivitate a procedului de prelucrare dimensională, sau de ce nu o anumită calitate a suprafeței materialului prelucrat.

Pentru programul experimental s-a realizat cu ajutorul programului de modelare statistică experimentală reprezentarea grafică a diagramei de corelație, respectiv raportul dintre valorile experimentale măsurate și valorile experimentale estimate.

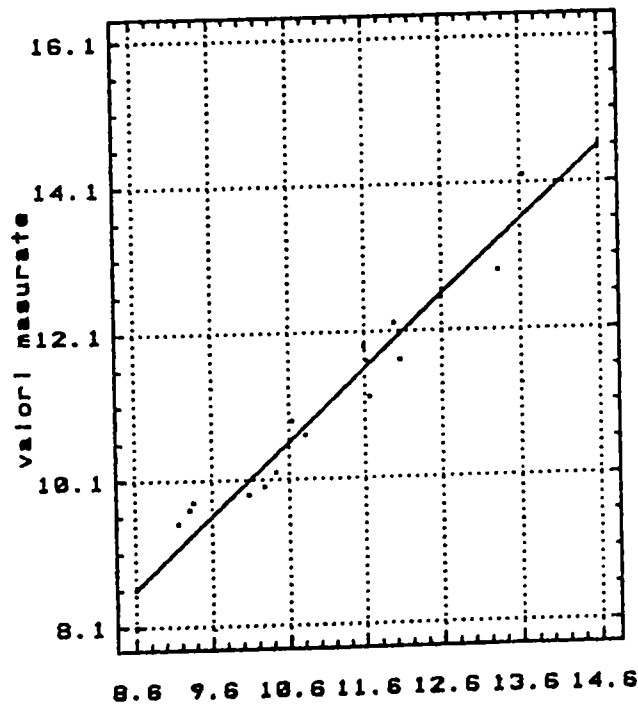
Așa cum se poate observa în figurile 7.11. ... 7.13., împrăștierea rezultatelor experimentale



valori estimate
 Fig. 7.11.
 Q_p [mm³/min]



valori estimate
 Fig. 7.12.
 γ [%]



valori estimate
 Fig. 7.13.
 R_a [μm]

obținute la final, rezultate experimentale obținute cu ajutorul unui experiment factorial complet central compus 2^4 , este corespunzătoare conducând la un coeficient de corelație cuprins între valorile $k = 0.958 - 1$.

Acest lucru conduce la concluzia că rezultatele experimentale măsurate concordă într-o manieră mai mult decât acceptabilă cu valorile estimate cu ajutorul funcțiilor de regresie.

Este de remarcat și de scos în evidență problema efectelor standard care stau la baza influențării, într-un punct pozitiv și negativ a procesului de prelevare de material la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Astfel folosind *diagrame de tip PARETO*, programul de modelare statistică experimentală prezentat a scos în evidență care sunt *efectele standard* a variabilelor independente folosite și luate în calcul funcție de anumite funcții obiectiv de interes major. (Fig. 7.14...7.16.).

O primă constatare este cea care evidențiază importanța covârșitoare a vitezei de avans care așa cum s-a arătat cu puțin mai înainte este o reflectare a presiunii de contact realizate între obiectul supus prelucrării și obiectul de transfer.

Practic presiunea de contact și implicit viteza de avans este parametrul care creează echilibrul pe de-o parte între cantitatea de material îndepărtată prin efecte termoelectrice și cea îndepărtată prin mecanismele de natură mecanică, iar pe de altă parte tot viteza de avans asigură și echilibrul între cele două mecanisme termoelectrice de îndepărtare de material (efect Joule-Lenz și arc electric nestaționar).

Celelalte influențe sunt deja diferențiate, funcție de parametrul tehnologic urmărit.

Pentru productivitatea prelucrării al doilea factor de influență cu pondere mare este intensitatea curentului electric din spațiul de lucru. Și această poziție, cu pondere ridicată este normală ținând cont de relațiile (Joule-Lenz și arc electric) unde influența intensității curentului este directă.

Al treilea factor cu influență destul de însemnată asupra productivității prelucrării este viteza relativă între obiectul de transfer și obiectul de prelucrat. Această influență poate fi motivată prin faptul că ea este determinantă la localizarea temporară a mecanismelor elementare de îndepărtare de material, conducând la obținerea unor timpi optimi de desfășurare a proceselor elementare.

Pe ultima poziție din cele patru analizate se situează debitul de lichid, care constituie mediul de lucru. Și influențele asamblate ale parametrilor de reglare evidențiază influența într-o ordine asemănătoare cu ordinea de influență individuală.

În condițiile impunerii maximizării productivității prelucrării, un deziderat urmărit în cadrul lucrării, ordinea de influență a parametrilor de reglare asupra funcțiilor obiectiv uzură (uzură relativă) și calitatea suprafeței prelucrate (rugozitatea R_a) este normală.

La desfășurarea cercetărilor experimentale au fost analizate aceste două variabile de stare deoarece s-a considerat că ele sunt reprezentative.

Astfel uzura relativă este funcția obiectiv care poate caracteriza în ansamblu procesul eroziv, oferind o imagine globală a procesului de prelevare de material, în general la prelucrările cu energii concentrate și în caz particular la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact E.E.R.C.

Ca și variabilă de stare care caracterizează calitatea suprafeței prelucrate s-a considerat a fi necesar și suficient studiul evoluției funcției obiectiv *abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate R_a [μm]*.

Este totuși de subliniat faptul că de-a lungul măsurătorilor s-au cules date despre alți parametri care caracterizează starea și calitatea suprafeței prelucrate cât și starea și calitatea suprafeței obiectului de transfer. Acești parametri au fost interpretați și nu numai determinați cu ajutorul unui aparat de măsură și control digital SURTRONIC.

Alți parametri care au fost receptați și analizați cu ajutorul aparatului digital amintit au fost:

- ◆ înălțimea maximă a microneregularităților R_3 [μm];
- ◆ înălțimea medie a microneregularităților R_2 [μm];
- ◆ pasul microneregularităților s [μm].

Binențeles că din punct de vedere statistic ar fi fost complicat să se analizeze atât de multe funcții obiectiv care să abordeze problema calității suprafeței prelucrate.

La ambele funcții obiectiv, se identifică importanța vitezei relative pentru obiectul supus prelucrării și cel de transfer, și doar în poziția a treia intensitatea curentului electric. Și de această dată “asamblarea” parametrilor evidențiază aceeași ordine de influență (viteză de avans + viteză relativă, intensitatea curentului + viteză relativă), etc.

Este interesant faptul că are loc o rocadă a influențelor pe care le au parametri de reglare asupra ambelor funcții obiectiv prin valorile acestora exprimate la puterea a doua.

Este de remarcat, așa cum s-a arătat faptul că variabila independentă **viteza de avans v_{av}** are o influență foarte importantă indiferent de natura funcției obiectiv analizate.

Se poate conchide că influența **viteza de avans v_{av}** deci a presiunii existente între O.P și O.T. asupra funcțiilor obiectiv productivitate, uzură relativă și calitatea suprafeței este decisivă în procesul de prelevare, respectiv debitare, prin eroziune electrică cu rupere de contact.

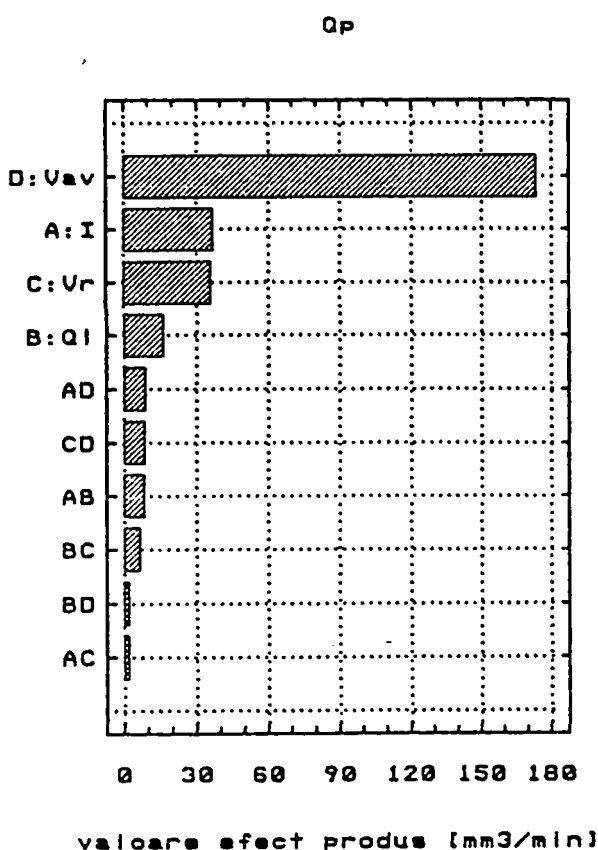


Fig. 7.14.

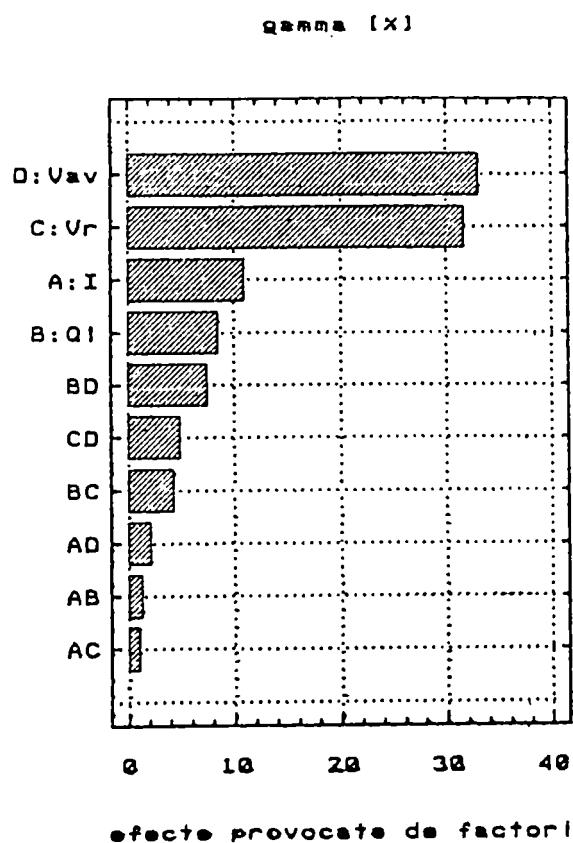


Fig. 7.15.

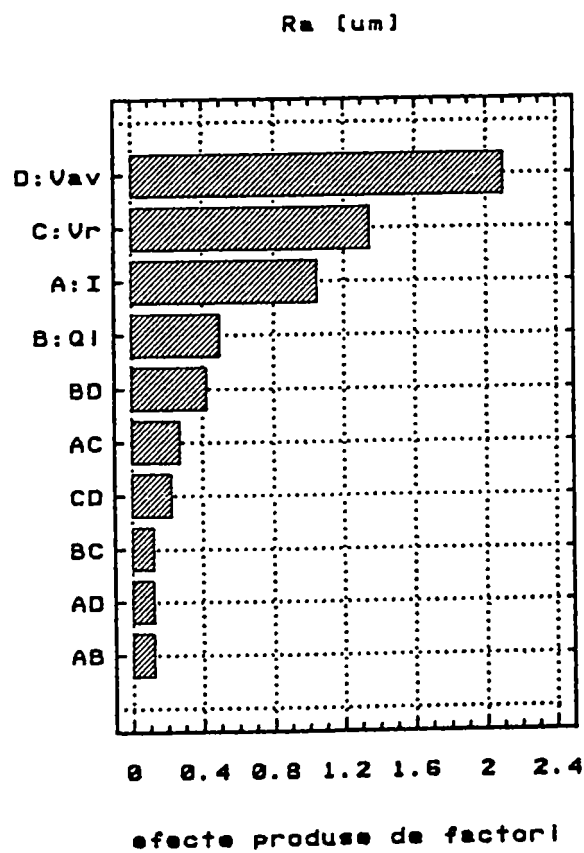


Fig. 7.16.

Folosind modelarea statistică experimentală și modelele matematice determinate pentru fiecare experimentul conceput s-au trasat diagrame spațiale, curbe de răspuns, pentru evaluarea evoluției funcțiilor obiectiv studiate și analizate.

Acest tip de program factorial folosit a fost suficient pentru conducerea cercetărilor și a furnizat estimări ale rezultatelor cu o precizie ridicată așa cum s-a scos în evidență în figurile 7.11. ... 7.13.

Cu ajutorul Softurilor "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" și "STATGRAPHICS" folosite intenționat împreună, pentru a putea valida interpretarea rezultatelor experimentale între ele sub formă de *curbe de răspuns experimentale*, s-au de determinat și finalizat evoluțiile spațiale, plane și de alte naturi ("cuburi tehnologice") ale funcțiilor obiectiv considerate a fi relevante și importante pentru un proces de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Astfel s-au determinat și studiat evoluțiile productivității prelucrării Q_p [mm^3/min], uzurii relative γ [%], precum și abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate R_a [μm] funcție de variabilele independente care au reprezentat datele de intrare în sistem adică în obiectul supus cercetării.

7.4. Productivitatea prelucrării.

Se observă că, pentru un program experimental de ordinul I, productivitatea prelucrării (figurile 7.17. – 7.22) are un maxim pentru diferite valori ale parametrilor de intrare și anume:

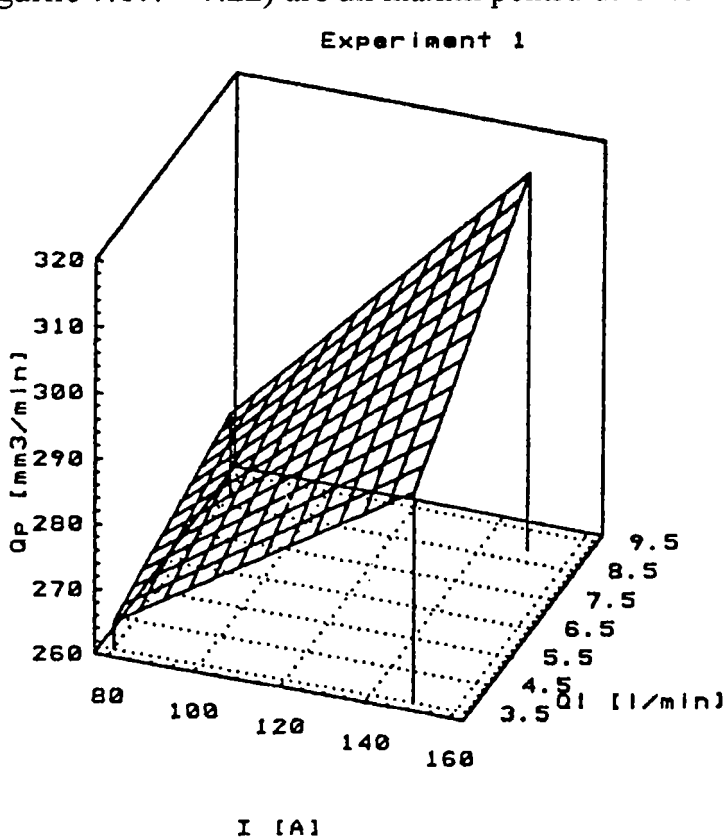


Fig. 7.17.

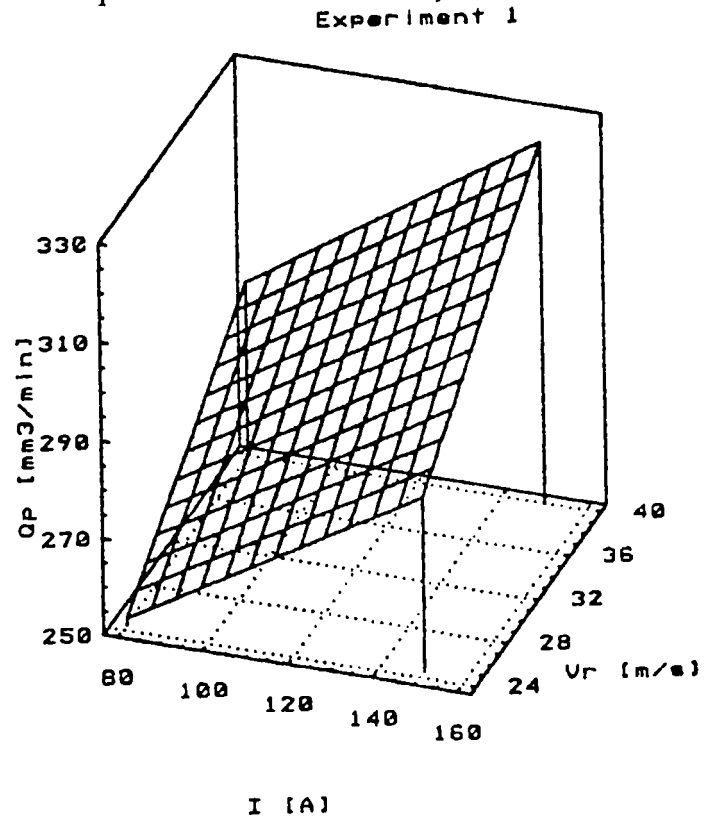


Fig. 7.18.

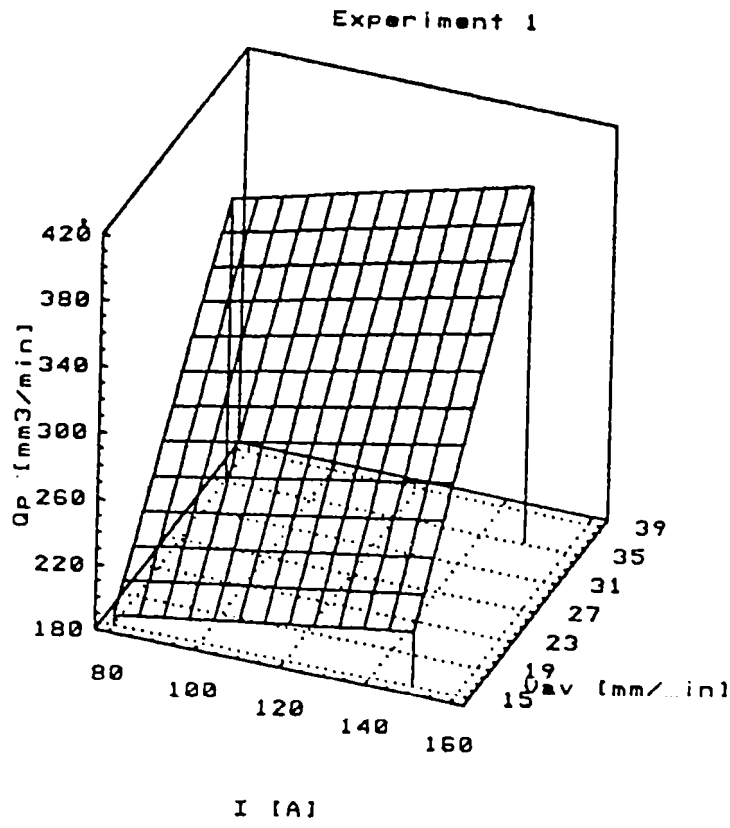


Fig. 7.19.

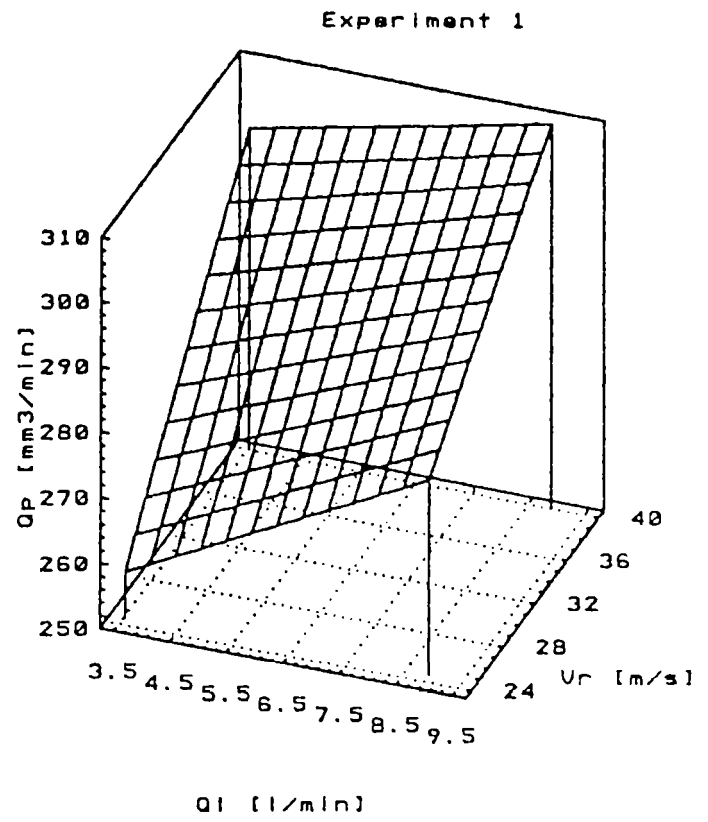


Fig. 7.20.

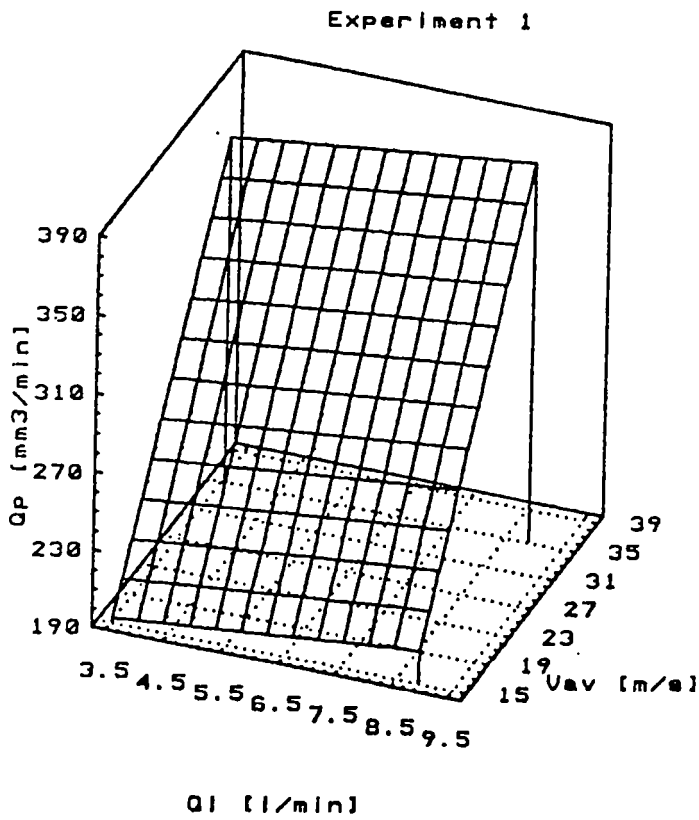


Fig. 7.21.

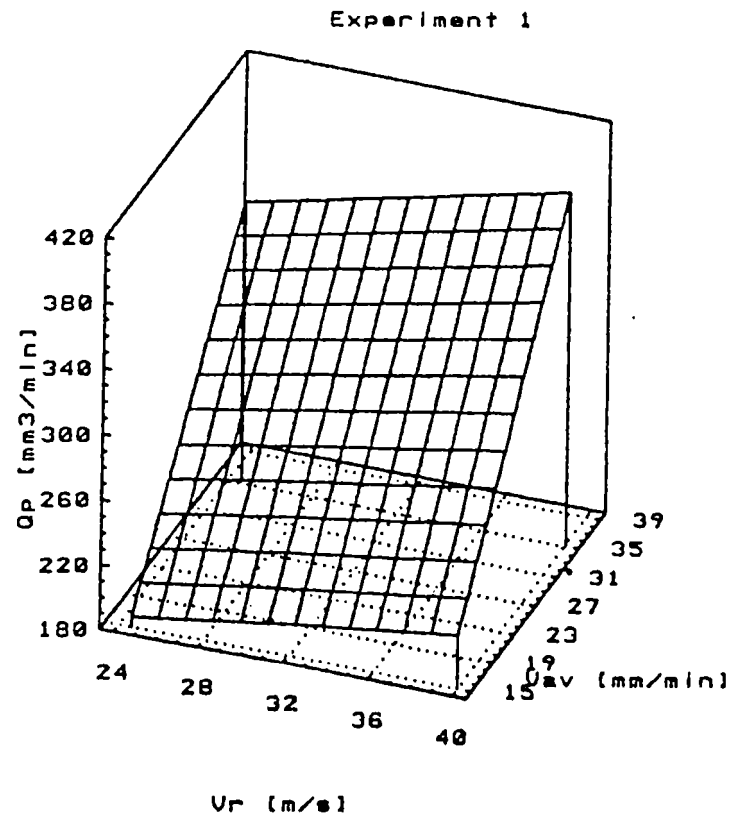


Fig. 7.22.

- dacă $I=150[A]$, $Q_f=9 [l/min]$;
- dacă $I=150[A]$, $v_r=39 [m/s]$;
- dacă $I=150[A]$, $v_{av}=35 [m/s]$;

Astfel de perechi cu valori ale factorilor de influență care conduc la valori maxime ale productivității prelucrării pot fi identificate și din celelalte grafice, toate ajungând la aceste valori numai în domeniul de existență admis pentru parametrii de reglare. Valorile maxime obținute pentru productivitatea prelucrării sunt pe de-o parte o consecință a “asamblării” factorilor de influență iar pe de altă parte de condițiile experimentale admise (de exemplu: limitarea intensității curentului electric la valori relativ mici – 1501 A).

Urmărind evoluția productivității prelucrării în dependență directă de parametrii de reglare admiși pentru analize se pot constata influențe cu ponderi diferite, așa cum s-a constatat din analiza diagramelor de tip Pareto. Cea mai substanțială influență o are viteza de avans, care cu toate că a oferit unele informații prin utile programul experimental de ordinul I nu a răspuns cerințelor cercetării, deoarece adecvanța modelului nu a fost pe măsura așteptărilor. Așa cum s-a arătat anterior s-a apelat la un al doilea program experimental de ordinul al doilea, factorial central compus complet. Acesta a corespuns din punct de vedere statistic foarte bine asigurând o precizie și o adecvanță foarte bună a modelului.

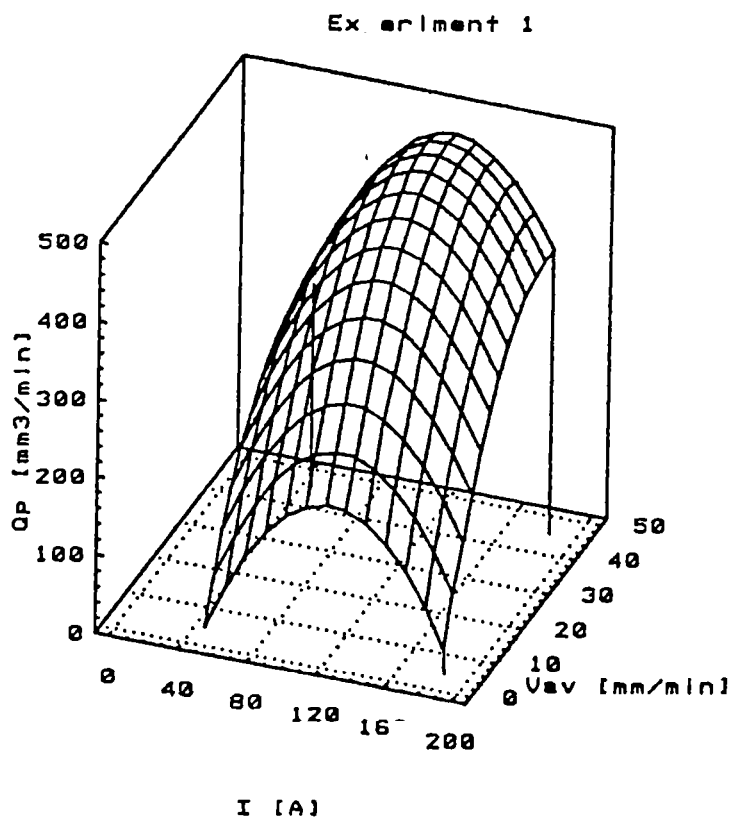


Fig. 7.23.

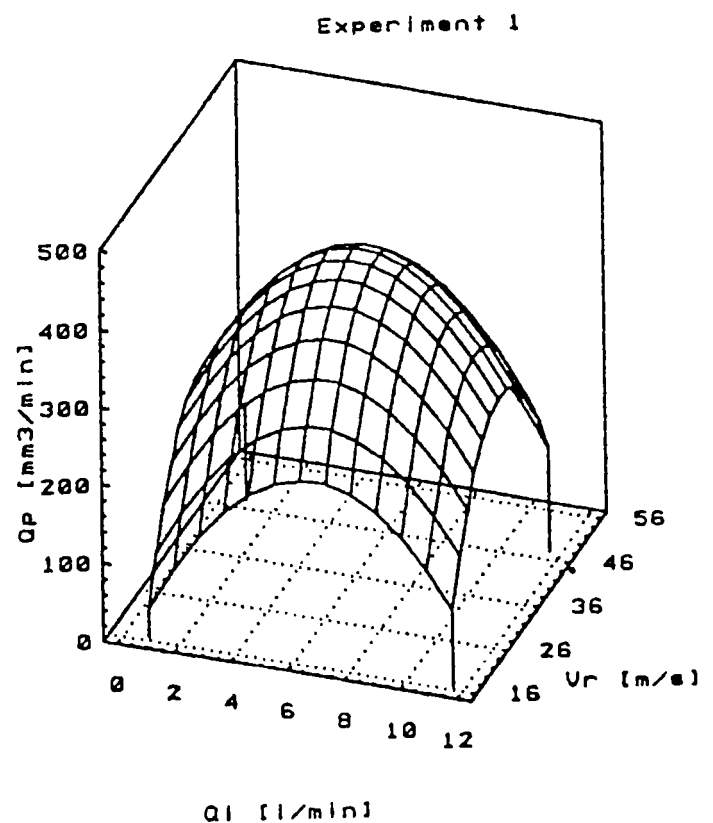


Fig. 7.24.

Astfel figurile 7.23. - 7.28. prezintă evoluția productivității prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a aliajelor sale, rezultate obținute în urma realizării programului experimental de ordinul doi.

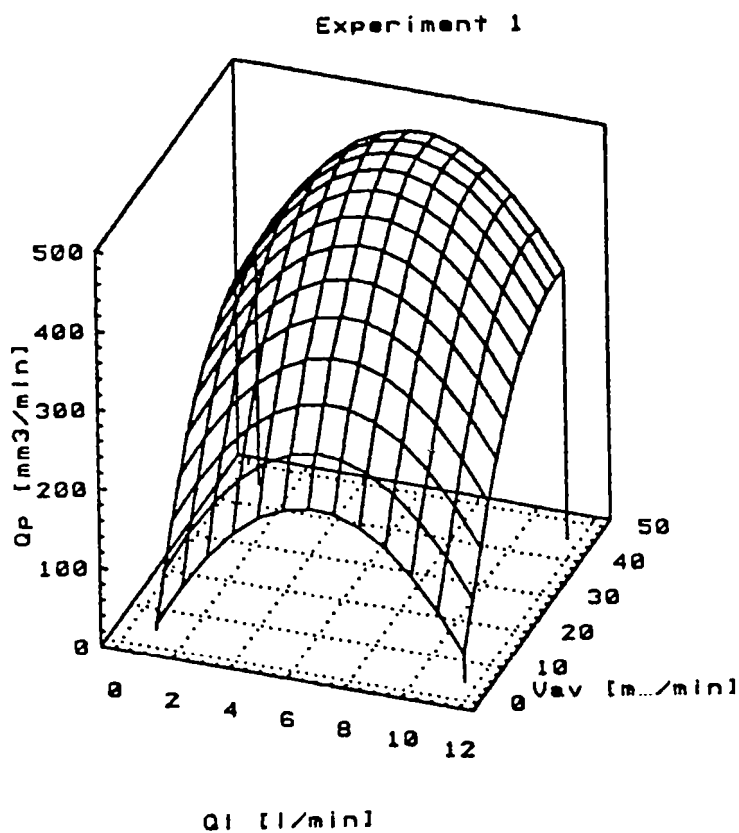


Fig. 7.25.

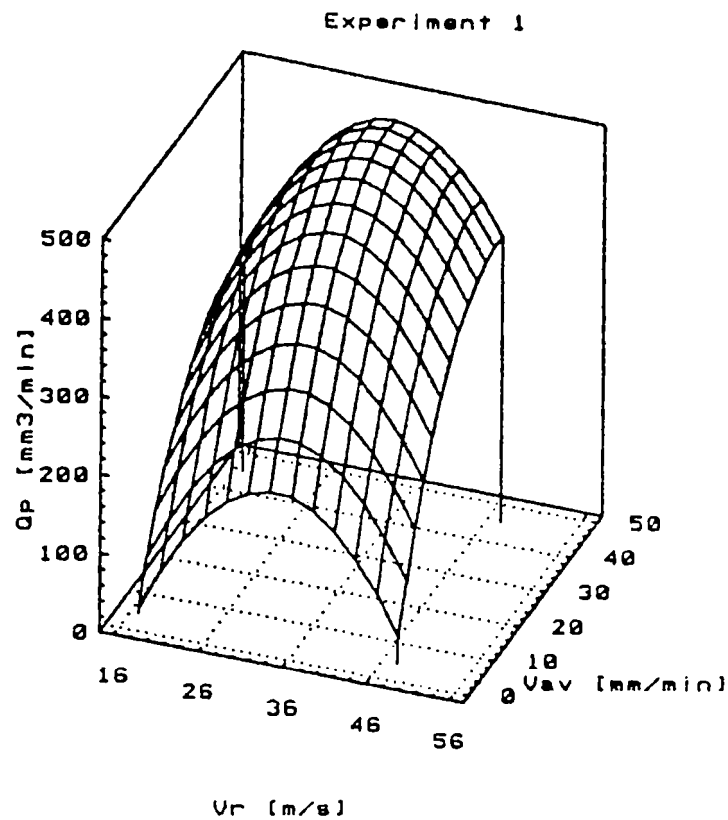


Fig. 7.26.

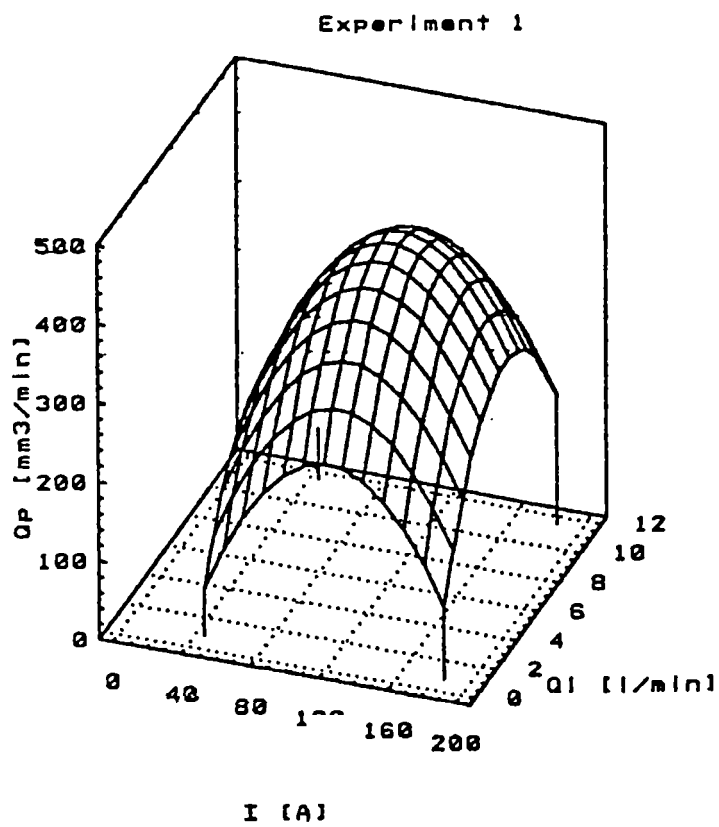


Fig. 7.27.

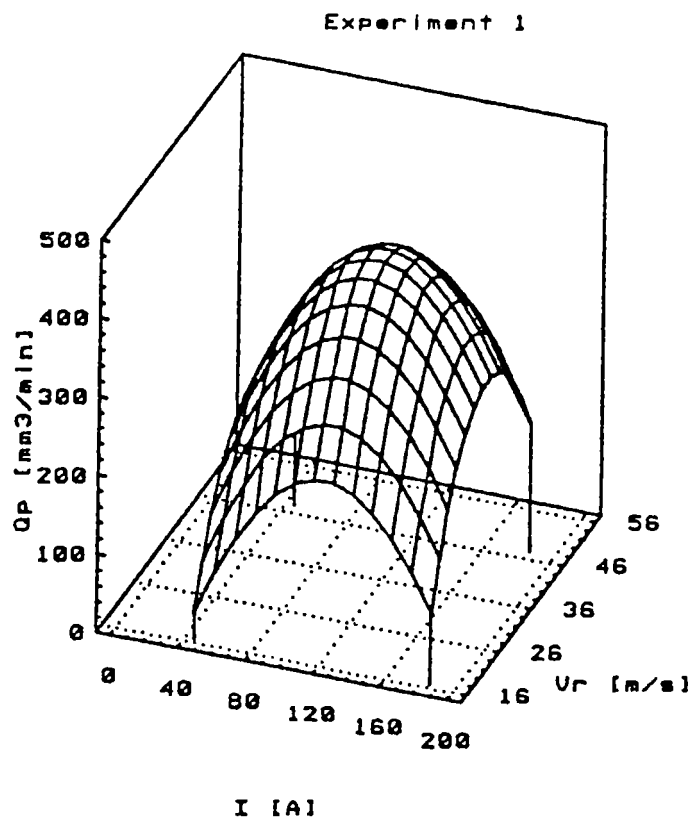


Fig. 7.28.

Analiza evoluției funcției obiectiv productivitatea prelucrării scoate în evidență ca pentru toți factorii de influență analizați se obțin valori optime, maxime, atât în cazul studiului individual de influență a unui parametru cât și în cazul “asamblării” lor. Aceasta este de altfel principalul avantaj al acestui gen de abordare al cercetărilor- identificarea optimului funcției obiectiv pentru o anumită grupare valorică a factorilor de influență.

Viteza de avans, care după cum s-a arătat constituie o exprimare a presiunii de contact existente între obiectul supus prelucrării și obiectul de transfer, asigură obținerea unor maxime ale productivității prelucrării la valori de circa 40...45 mm/min.

Se poate admite că la aceste valori ale vitezei de avans se realizează presiuni de contact care să asigure un număr optim de microcontacte unde se desfășoară un proces Joule-Lenz cu intensitate mare, dar în același timp această presiune asigură și desfășurarea unui număr maxim de descărcări în arc electric nestaționar.

Cu valori ale vitezei de avans mai mici decât cea care conduce la maximizarea productivității se vor realiza un număr mai mic de microcontacte cu efecte imediate de reducere a dezvoltării de căldură prin efect Joule-Lenz și cu efecte, din timpul imediat următor, de reducere a numărului microdescărcărilor în arc electric nestaționar.

Admițând și o diminuare a îndepărtării de material prin mecanismele de natură mecanică este suficient motivată diminuarea productivității prelucrării.

La valori mai mari ale vitezei de avans decât cele optime trebuie analizate presiuni superioare.

Aceste presiuni pot conduce la deformări elasto-plastice ale microproeminențelor cu efect imediat în creșterea suprafeței microcontactelor.

Creșterea ariei la nivelul unui microcontact are ca și consecință reducerea rezistenței de trecere și ca urmare cantitatea de căldură dezvoltată- prin efect Joule-Lenz se reduce, reducându-se și temperatura microcontactului. În aceste condiții cantitatea de material adusă în stare topită sau de vapori va fi mai mică.

Un alt efect al creșterii presiunii de contact (creșterea vitezei de avans) se referă la localizarea temporară a microcontactului. Prin creșterea ariei contactului, crește și durata de menținere a lui și deci efectul de impuls este diminuat, o parte a cantității de căldură dezvoltate fiind preluate de masa obiectului supus prelucrării.

Dacă la prelucrarea aluminiului și a aliajelor lui efectul încălzirii masice superioare a obiectului de prelucrat, ca urmare a creșterii vitezei de avans nu este vizibil imediat la debitarea obiectelor de prelucrat din oțeluri este foarte bine vizibilă o zonă cu modificări structurale tot mai pronunțate.

Din punct de vedere al microarcelor electrice se poate afirma, că mărirea ariei microcontactelor electrice care conduce la creșterea duratei de menținere a lor, provoacă pe de-o parte o reducere a numărului lor iar pe de altă parte conduce la reducerea timpului de existență a acestora, prin probabilitate mărită de a se realiza un nou contact direct care va stinge microdesărcarea.

Intensitatea curentului electric din spațiul de lucru al debitării aluminiului și aliajelor lui prin E.E.R.C determină la rândul lui o maximizare a productivității care pentru valorile admise în acest program experimental asigură o cantitate maximă material îndepărtat la suprafața OP pentru valori de 100...120 A.

Valorile mai mici ale intensității curentului conduc în mod normal la cantități mai reduse de material îndepărtat la nivelul OP prin diminuarea în comparație cu cea care determină maximizarea productivității, a cantității de căldură dezvoltate atât prin efect Joule-Lenz cât și prin arc electric nestaționar.

O depășire a nivelului curentului electric acceptată ca optimă are efecte negative asupra productivității prelucrării. Privită sub aspectul elementar creșterea cantității de căldură dezvoltate atât prin efect Joule-Lenz cât și prin microdescărcări în arc electric nestaționar determină ca la suprafața obiectului prelucrării să fie îndepărtat cantități de material superioare. Aceasta va determina la rândul ei existența între cele două obiecte în interacțiune OT-OP a unor particule nesolidificate în număr mărit și cu dimensiuni mai mari. Ca urmare sunt create premisele ca numărul de microcontacte să scadă și în acest fel scade numărul microsurselor termice. În același timp poate fi admisă o creștere ușoară a cantității de material prin îndepărtare mecanică de tip abrazare (lepuire), dar și sub acest aspect situația este nefavorabilă deoarece această îndepărtare poate fi localizată spațial mai accentuat. Aceste ipoteze pot fi justificate și prin analiza calității suprafeței debitate prin E.E.R.C. unde s-au constatat înrăutățiri ale rugozității pentru valorile intensității de curent care depășesc cele optime.

Viteza relativă asigurată între obiectul supus prelucrării și obiectul de transfer asigură un maxim al productivității la valori la circa 30m/s. Acest factor de influență este determinant pentru localizarea temporară a celor două principale surse care conduc la îndepărtarea de material-efectul Joule –Lenz și decărcarea în arc electric nestaționar. Se poate admite că valori ale vitezei relative de circa 30m/s asigură un raport optim (un echilibru adecvat) între cele două mecanisme elementare. Orice abatere de la această valoare va dezechilibra raportul iar efectul imediat este reducerea productivității prelucrării.

Dacă viteza relativă va avea valori mai mici decât valoarea optimă durata proceselor elementare va fi mărită. Astfel crește durata microcontactelor electrice care poate lua astfel de

valori încât încălzirea OP să treacă din domeniul microvolumelor încălzite spre domeniul încălzirii masice, ceea ce va determina o reducere a cantității de căldură care conduce la topire sau la vaporizare. Aceeași reducere a vitezei se reflectă în cel de-al doilea proces elementar important prin creșterea duratei de existență a microdescărcărilor în arc electric nestaționar. Efectele sunt asemănătoare cu cele prezentate în cadrul microcontactelor și anume încălzirea OP devine masică și cantitatea de metal topit sau vaporizat va fi mai mică.

În cazul în care viteza relativă depășește valoarea optimă durata de existență a celor două microsurse termice scade, cum timpul este un factor important pentru încălzirea localizată cu influențare directă a cantității de căldură dezvoltate, este normal ca scăderea lui prin creșterea vitezei relative, să conducă la scăderi ale productivității.

După cum s-a arătat și în cazul experimentului de ordinul I, productivitatea prelucrării poate fi influențată chiar dacă în limite mai restrânse de cantitatea de lichid utilizată pentru asigurarea mediului de lucru.

În cazul debitării materialelor prin E.E.R.C. apa tehnologică utilizată ca mediu de lucru îndeplinește principalele roluri de concentrare spațială a microdescărcărilor în arc electric nestaționar și de răcire a celor două obiecte în interacțiune. Spre deosebire de prelucrarea prin eroziune electrică cu descărcări amorstate prin străpungerea unui interstițiu, unde lichidul de lucru îndeplinește și funcția importantă de evacuare a produselor eroziunii, la prelucrarea prin E.E.R.C., caracterizată printr-o mișcare între cele două obiecte în interacțiune, această funcție a lichidului de lucru este diminuată, principala cauză de îneștărire a produselor eroziunii fiind mișcarea relativă. Se poate accepta faptul că la prelucrarea prin E.E.R.C. existența lichidului de lucru favorizează mecanismul evacuării.

În acest context trebuie admisă ipoteza că o cantitate prea mică sau prea mare de lichid de lucru va conduce la temperaturi ale obiectelor în interacțiune care se abat de la cea optimă. În acest fel pot fi obținute, fie temperaturi care să determine o accentuare a deformațiilor elastice plastice, fie temperaturi care să preieie o parte mărită din cantitățile de căldură dezvoltate de microsursele termice (cantitate mai mare de lichid de lucru).

Programul de modelare statistică experimentală oferă posibilitatea de a studia evoluția funcțiilor obiectiv funcție de variabilele de stare independente și cu ajutorul unor curbe plane care reprezintă practic secțiuni perpendiculare pe axa OZ (axa verticală) prin graficele spațiale amintite și prezentate anterior.

Pornind de la aceste afirmații care recomandă întreaga cercetare experimentală făcută, se observă în figurile 7.29. ... 7.32. reprezentările plane văzute prin curbe de nivel.

Acestea pot oferi informații tehnologice importante ale valorilor productivității prelucrării funcție de variabilele independente (datele de intrare) din proces.

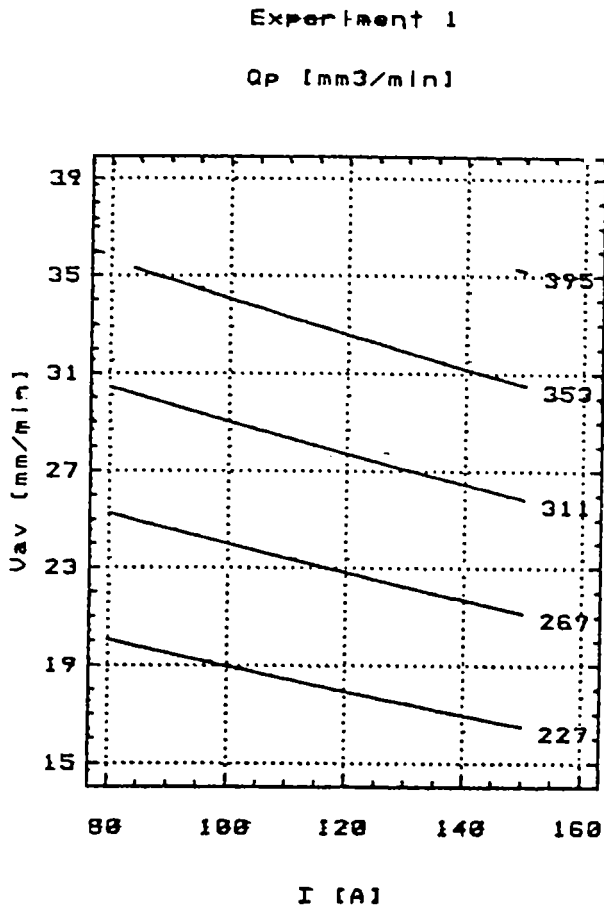
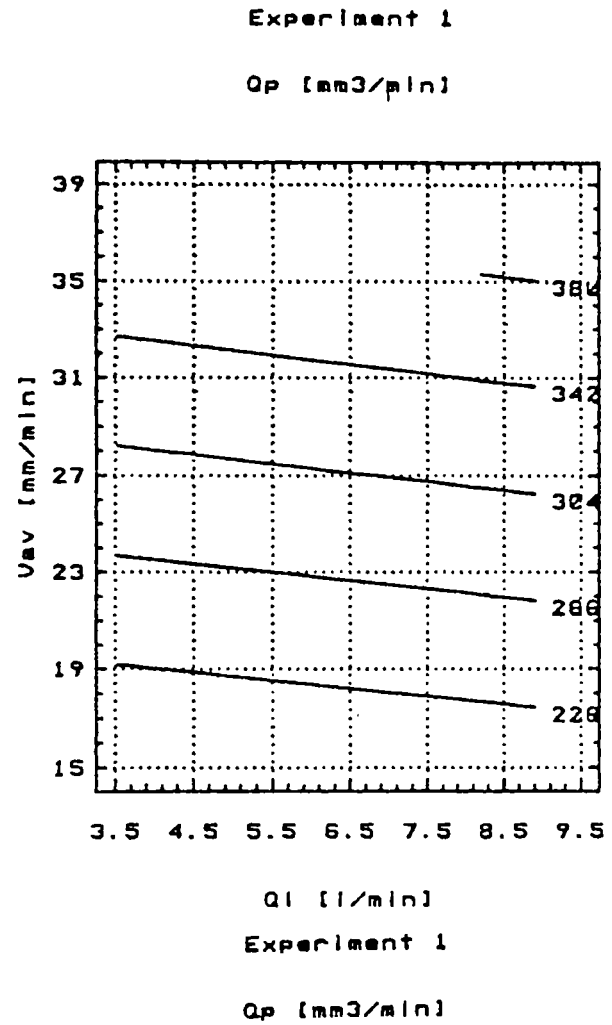


Fig. 7.29.
 Experiment 1
 Q_p [mm³/min]



Experiment 1
 Q_p [mm³/min]

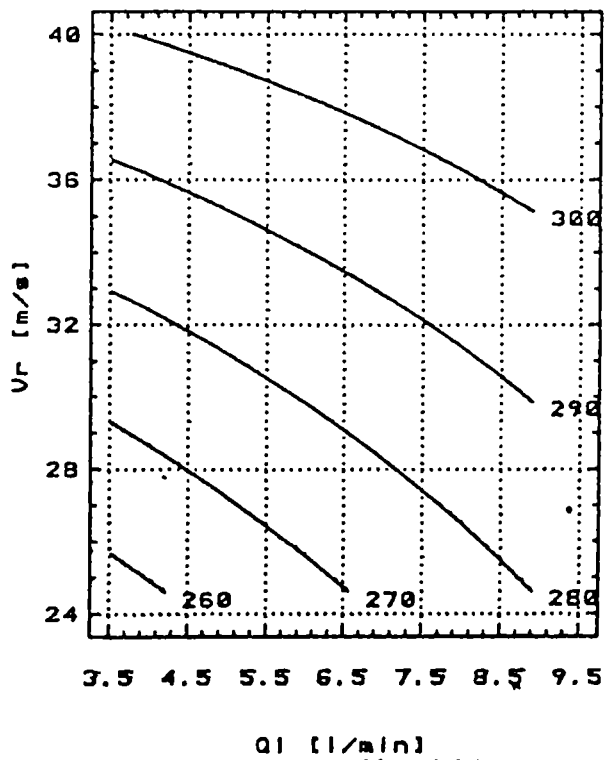


Fig. 7.31.

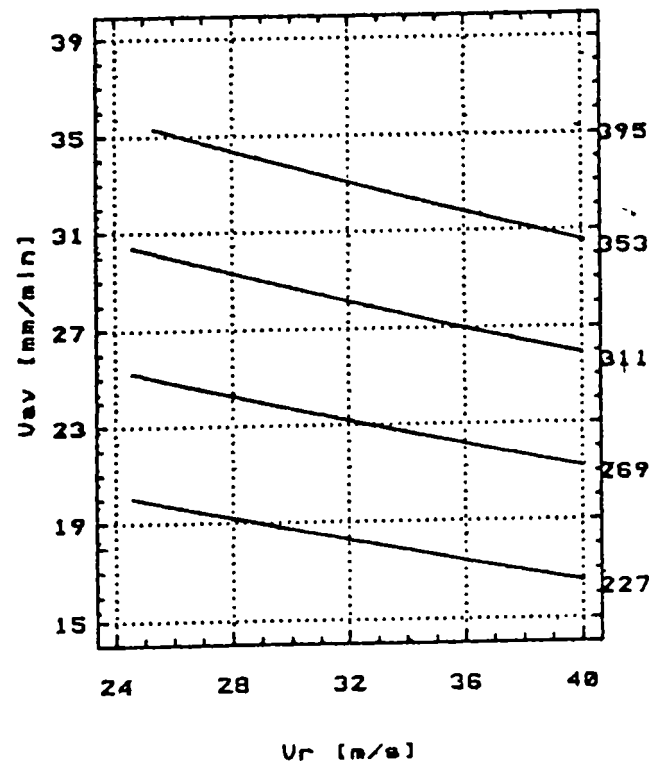


Fig. 7.32.

Este interesant și demn de remarcat faptul că maximum de productivitate a prelucrării reprezintă de fapt optimul dorit atunci când uzura relativă este minimă iar calitatea suprafeței este maximă, iar aceasta se obține pentru diferite valori numerice experimentale ale intensității curentului electric, vitezei relative, vitezei de avans și nu în ultimul rând a debitului de lichid.

Programul de modelare statistică și experimentală a oferit și posibilitatea de a putea trasa așa numitele imagini grafice denumite “cuburi tehnologice” care au rol de a explicita valorile considerate a fi importante din punct de vedere tehnologic cu rol de a putea obține în final o bază de date. (fig. 7.33., ... fig. 7.35.)

Astfel în figura 7.33. sunt exprimate valorile experimentale de interes tehnologic pentru funcția obiectiv productivitatea prelucrării, funcție de viteza de avans, debitul de lichid și viteza relativă.

Ținând cont de cele relevate până în prezent referitor la evoluția **productivității prelucrării** se pot afirma anumite puncte de vedere care sunt confirmate de rezultatele cu totul și cu totul favorabile obținute.

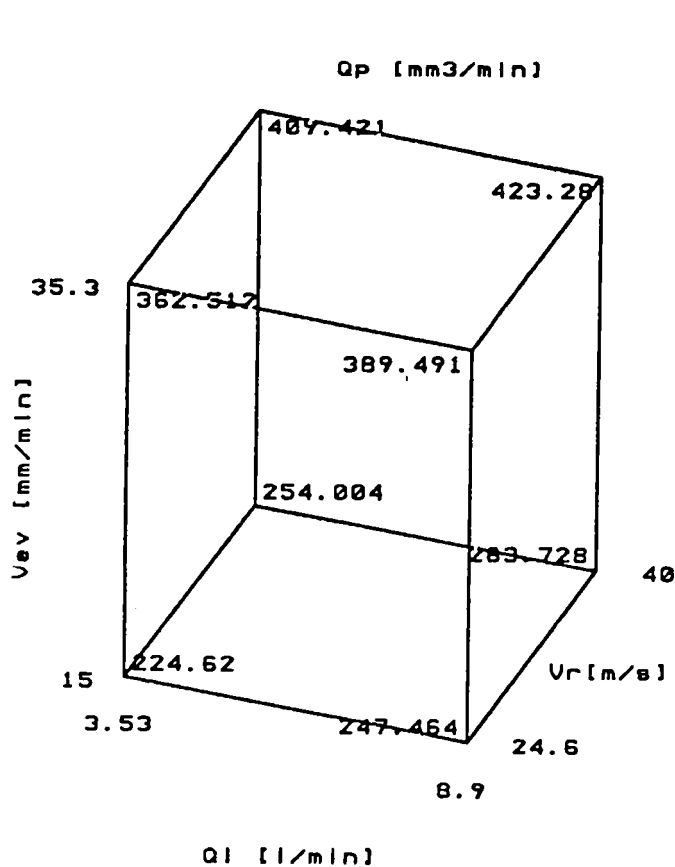


Fig. 7.33.

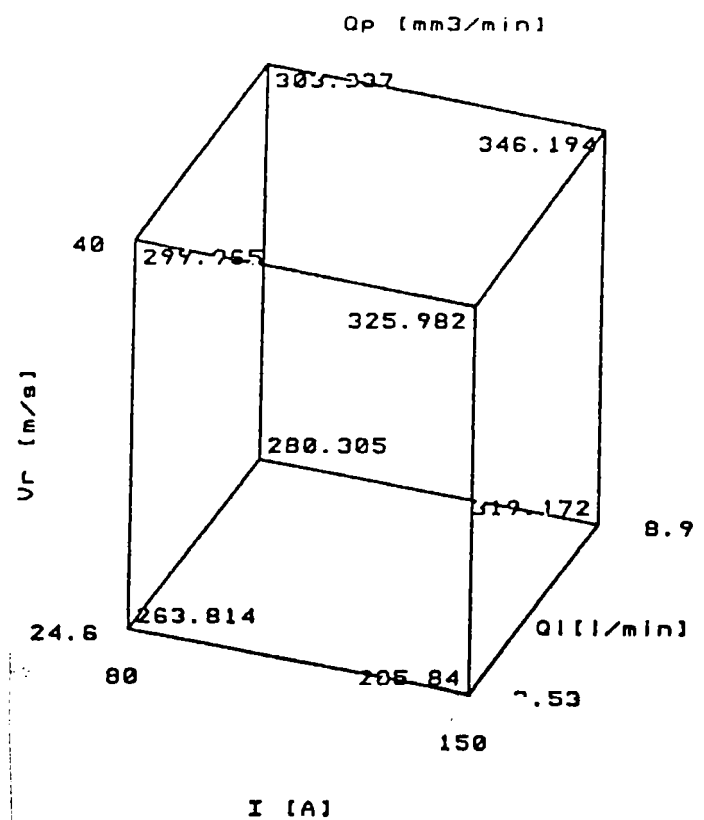


Fig. 7.34.

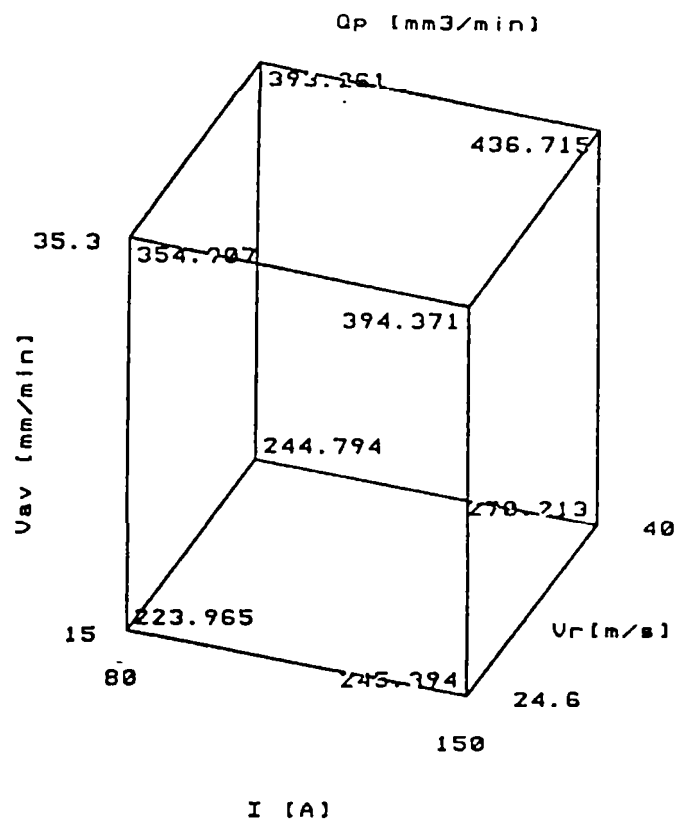


Fig.7.35.

Din analiza graficelor spațiale se poate spune că alegerea unei viteze de avans cuprinsă între 40-45 mm/min și respectiv impunerea pe cât posibil a unei viteze relative de circa 30m/s dar și a unui debit de aproximativ 6-8 l/min, va conduce la o productivitate maximă a procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și aliajelor sale.

7.5. Uzura obiectului de transfer.

Deoarece **uzura relativă** caracterizează în ansamblu fenomenele de îndepărtare de material la suprafața elementelor în interacțiune la prelucrarea dimensională prin eroziune prin faptul că exprimă procentual cantitatea de material prelevat la suprafața obiectului de transfer pentru prelevarea unității de volum la suprafața obiectului de prelucrat s-a considerat suficient această analiză fără a mai analiza detalat uzura volumică.[].

Dacă se analizează distinct uzura volumică a obiectului de transfer la prelucrarea prin E.E.R.C. se poate constata o variație normală a ei, variație asemănătoare cu cea identificată la analiza evoluției productivității prelucrării. Se poate afirma că dependența uzurii volumice are o formă asemănătoare cu cea identificată la prelucrarea prin E.E.R.C. a oțelurilor. Modificările chiar

substanțiale uneori trebuie puse pe seama împerecherii de materiale oțel – aluminiu care determină, prin proprietățile termo-fizice diferite ale materialelor și efecte tehnologice modificate.

Evoluția uzurii relative este diferită și anume poate fi funcție de tipul materialului obiectului de transfer, de tipul materialului prelucrat și funcție de programul experimental utilizat (funcție de regimul de lucru folosit).

În condițiile experimentale acceptate unde obiectul de transfer a fost constituit dintr-un disc de OL 37 și unde lichidul de lucru a fost apa se observă că, pentru un program experimental de ordinul I, uzura relativă (figurile 7.36. – 7.39.) are un maxim pentru diferite valori ale parametrilor de intrare și anume:

- dacă $I=140[A]$, $Q_f=3.8 [l/min]$;
- dacă $I=140[A]$, $v_r=39 [m/s]$;
- dacă $I=140[A]$, $v_{av}=35 [m/s]$;

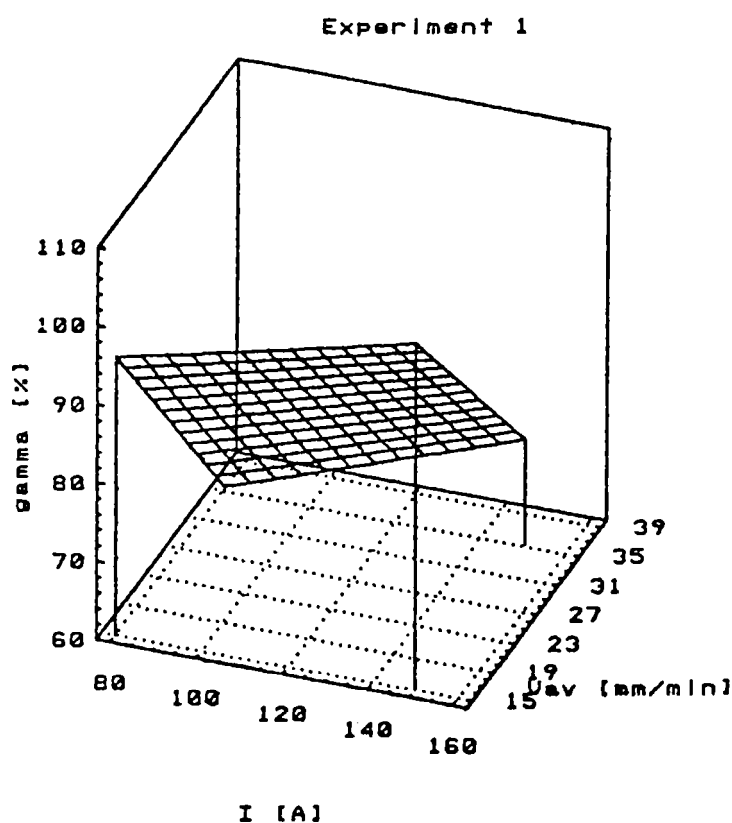


Fig. 7.36.

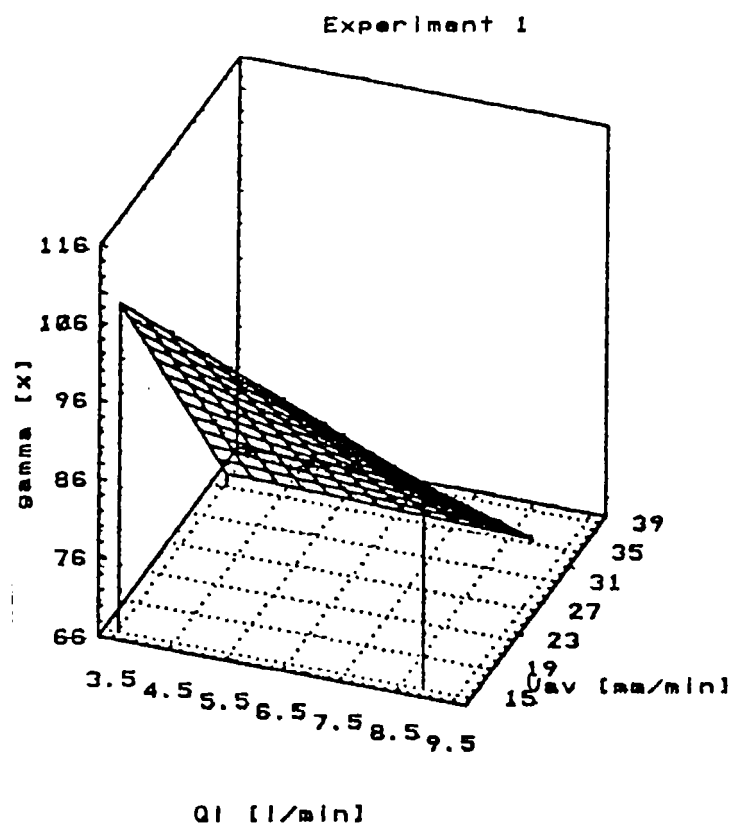


Fig. 7.37.

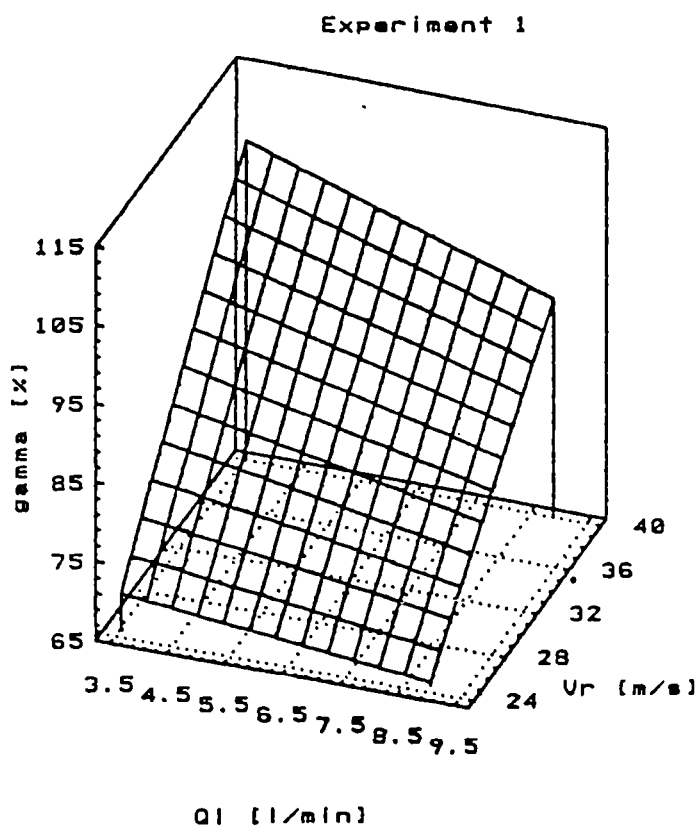


Fig. 7.38.

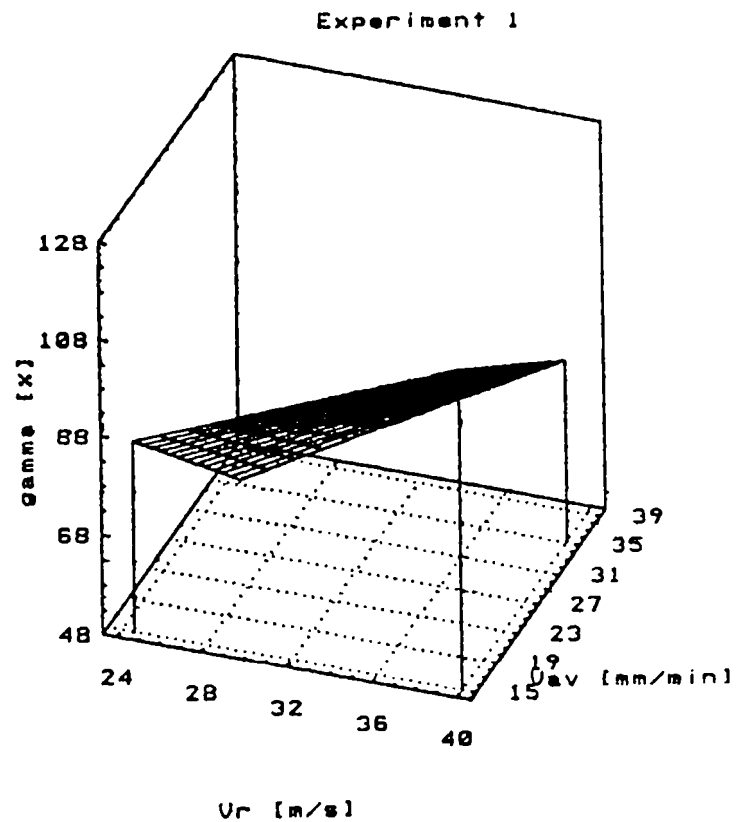


Fig. 7.39.

Se constată, deasemenea că variația diferiților parametri de reglare influențează diferit uzura relativă și anume: creșterea intensității curentului care alimentează spațiul de lucru și a vitezei relative conduce la o creștere a uzurii relative, în timp ce creșterile celorlalți parametri de reglare, admiși pentru această cercetare – viteza de avans și debitul de apă au influențe diverse.

Ținând cont de exprimarea uzurii relative, care explicitează o relație de dependență între cantitățile de material îndepărtate la suprafața celor două obiecte în interacțiune cât și de faptul că productivitatea prelucrării crește la rândul ei, cu creșterea intensității curentului electric (fig.7.19.), rezultă că uzura efectivă volumică a obiectului de transfer crește substanțial.

O posibilă motivare a acestei dependențe constă în intensificarea, odată cu creșterea intensității curentului electric a proceselor termoelectrice de îndepărtare de material corelate cu existența în interdependență a unor materiale cu proprietăți termofizice diferite, majoritatea în avantajul aluminiului și a aliajelor lui. Privită numai prin prisma îndepărtării de material prin procese de natură termoelectrică este normal ca la această împerechere, să rezulte cantități de material mai mari îndepărtate la suprafața obiectului de transfer decât cele îndepărtate la suprafața obiectului de prelucrat.

Spre deosebire de această influență în cazul creșterii vitezei de avans deci a creșterii presiunii exercitate de către obiectul de prelucrat asupra obiectului de transfer, pe lângă

mecanismele elementare de îndepărtare de material de natură termoelectrică își dezvoltă acțiunile și mecanismele elementare de îndepărtare mecanică de material. Sub acest aspect proprietățile obiectului de transfer din OL 37 sunt superioare proprietăților aluminiului și aliajelor lui, ceea ce conduce la creșteri mai reduse cu o menținere aproape constantă a îndepărtării termice de material la nivelul obiectului de transfer și implicit la reducerea uzurii relative.

În domeniul de variație a vitezei relative, între OT și OP este constatată o creștere continuă a uzurii relative odată cu creșterea acestui parametru de reglare. Corelând procentual această creștere cu creșterea productivității (fig. 7.20) este posibilă evidențierea unei creșteri procentual mai mici a uzurii relative în comparație cu productivitatea. Ca urmare rezultă o creștere mult mai mică a uzurii concrete volumice a OT odată cu creșterea vitezei relative. Se poate accepta faptul că odată cu creșterea vitezei relative, durata de acțiune a microsurselor electrotermice scade ceea ce conduce la încălziri tot mai pronunțat localizate. Dacă pentru materiale cu conductivitate termică mare cum sunt aluminiul și aliajele lui, acest fapt este deosebit reducându-se puternic posibilitatea de pierdere prin conducție a căldurii dezvoltate în microsursele electrotermice, pentru materialele uzuale destinate confecționării obiectului de transfer -OL 37- conductivitatea termică mai mică și proprietățile termofizice fac ca creșterea vitezei relative să aibe normal aceeași influență dar raportată la influența asupra aluminiului și a aliajelor lui să fie mult mai mică.

Scăderea uzurii relative a obiectului de transfer odată cu creșterea cantității de lichid care spală spațiul de lucru trebuie acceptată ca o consecință directă a creșterii productivității. Și la această influență trebuie acceptată localizarea volumică mai pronunțată a microsurselor termice cu efecte mai mari asupra cantității de material îndepărtată la obiectul din aluminiu decât la obiectul din OL 37 .

Și în acest caz o analiză procentuală comparativă a modificărilor productivității și a uzurii relative va conduce la concluzia că uzura volumică crește, dar această creștere este mai mică decât cea a productivității și ca urmare uzura relativă a OT va fi din ce în ce mai mică odată cu creșterea vitezei relative.

Este important de subliniat că pentru valorile parametrilor luate simultan în calcul nu se poate obține un minim al uzurii relative, ci numai aspectele individuale cu evidențierea unor influențe. De altfel, așa cum a fost subliniat anterior, programul experimental de ordinul I nu a răspuns cerințelor cercetării, deoarece adecvanța modelului nu a fost pe măsura așteptărilor. Deci s-a apelat la un al doilea program experimental de ordinul al doilea, factorial central compus complet. Acesta a corespuns din punct de vedere statistic foarte bine asigurând o precizie și o adecvanță foarte bună a modelului.

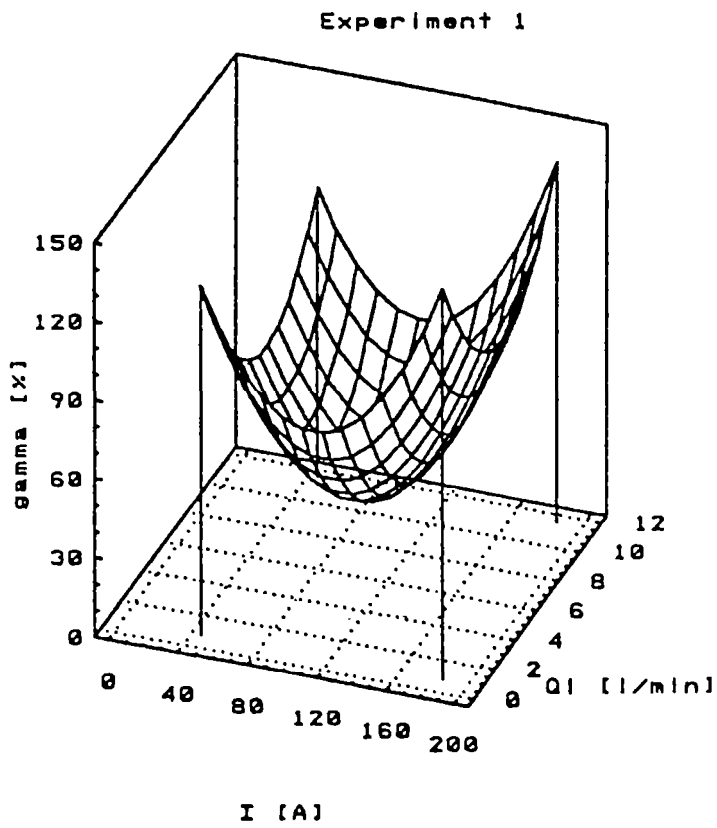


Fig. 7.40.

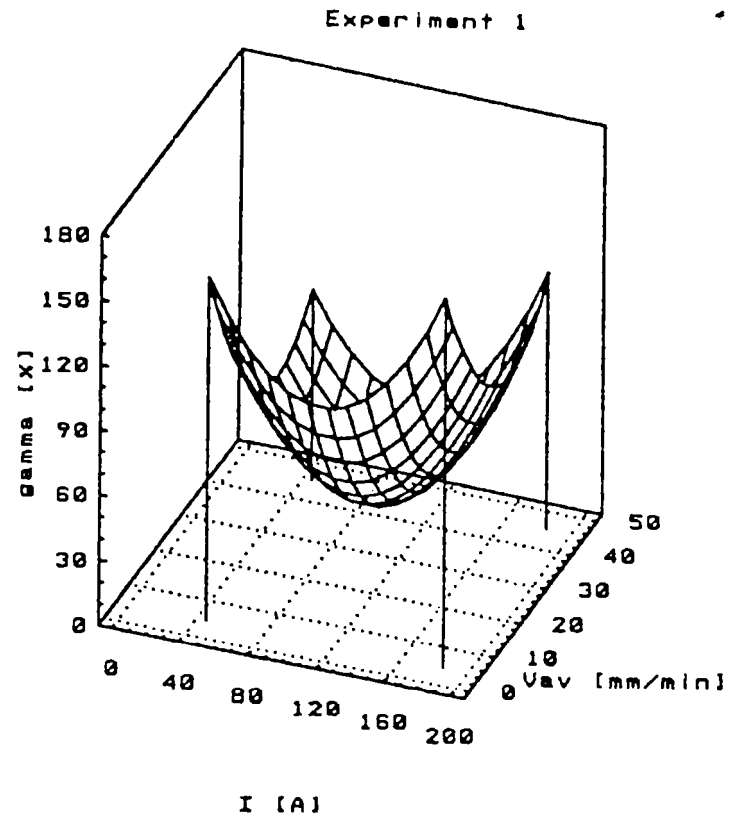


Fig. 7.41.

Astfel în figurile 7.40. - 7.45. se prezintă evoluția uzurii relative la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a alijelor sale.

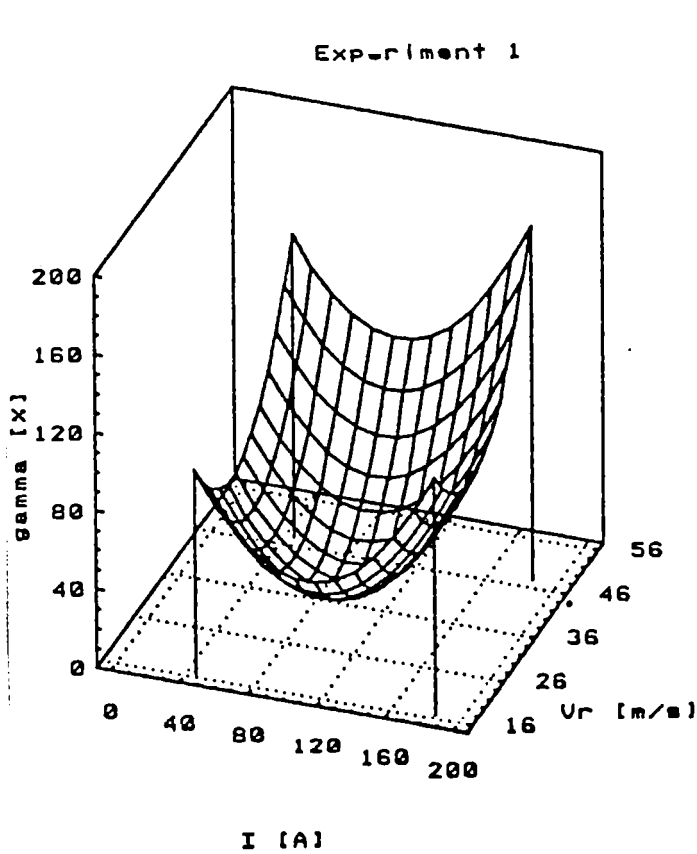


Fig. 7.42.

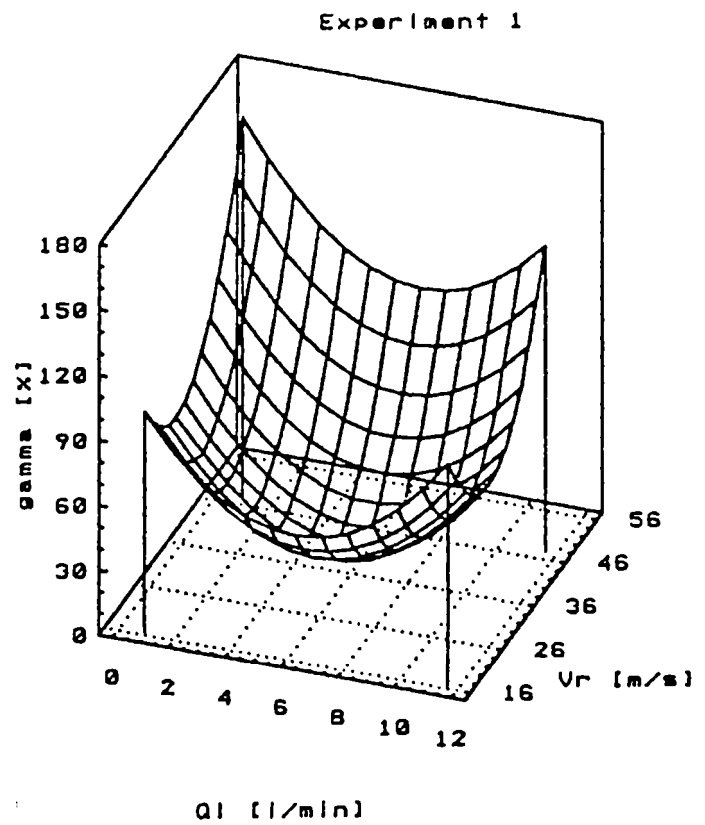


Fig. 7.43.

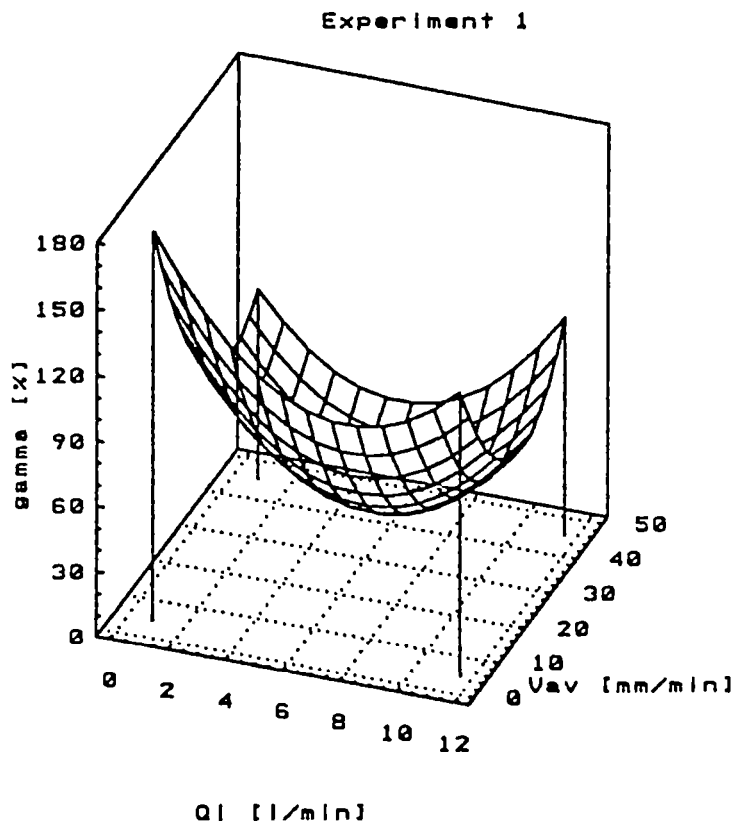


Fig. 7.44.

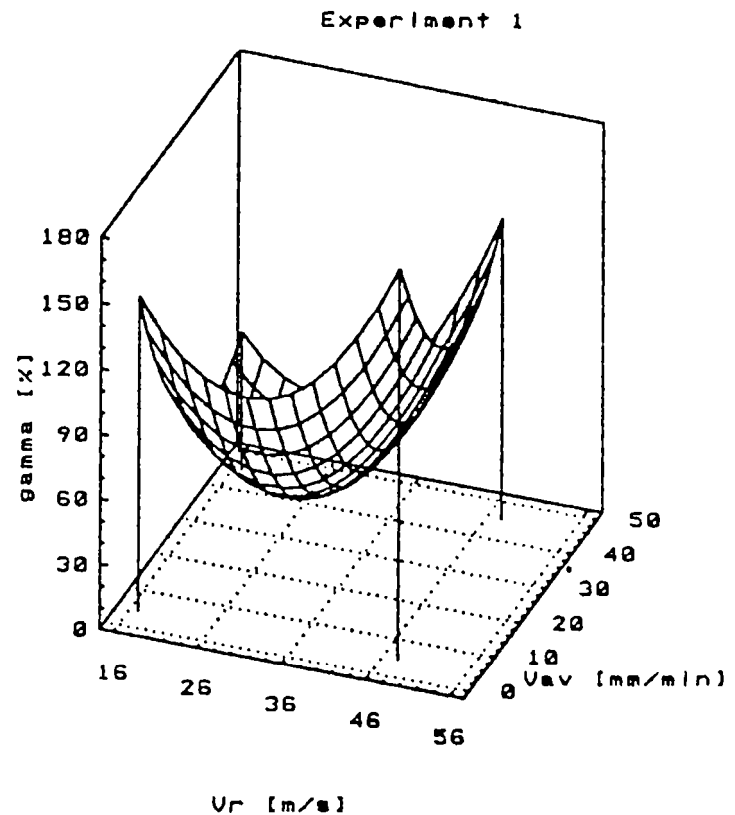


Fig. 7.45.

Acest experiment oferă o imagine mult mai amplă asupra influențelor parametrilor de reglare asupra uzurii relative, ca de altfel asupra tuturor funcțiilor obiectiv.

Variația tuturor factorilor de reglare conduce la identificarea unor valori minime, pentru uzura relativă, ceea ce va determina și limitarea pentru aplicațiile practice viitoare a domeniilor de variație a acestor parametrii în jurul parametrilor de optim.

Dacă pentru variația uzurii relative în același sens cu variația identificată, la experimentul de ordinul I trebuie acceptate aceleași motivații fenomenologice la variațiile în sens contrar a uzurii relative sunt necesare alte motivații, bazate însă pe aceleași mecanisme elementare.

La valori mici ale intensității curentului din spațiu de lucru creșterile lui conduc la scăderi ale uzurii relative și după depășirea unei valori, acceptate ca optime, aceeași creștere determină creșteri ale uzurii relative (creșteri identificate și la experimentul de gradul I).

La valorile mici ale intensității curentului, intensitatea microsurselor termice este mai mică și astfel influența asupra celor două materiale ale obiectelor aflate în interacțiune are efecte diferențiate cantitativ. Datorită intensității mici a microsurselor termice transmiterea prin conducție a căldurii dezvoltate va fi cu siguranță mai redusă și astfel aluminiul și aliajele lui, materiale cu

temperaturi de topire mai mici decât cele ale oțelului vor admite îndepărtarea unei cantități de material mai mari (productivitatea) decât cea îndepărtată la nivelul obiectului de transfer (uzura volumică) din OL 37 și în acest fel uzura relativă scade.

Pentru valori mari ale intensității curentului electric din spațiul de lucru cantitatea de căldură dezvoltată în microsursele electrotermice crește. Această creștere conduce la accentuarea “pierderilor” de căldură datorită conductivității termice a materialelor. Ca urmare creșterea productivității prelucrării va fi mai mică (alumiul și aliajele lui) în comparație cu cantitatea de material îndepărtată la nivelul OT (OL 37) și în consecință uzura relativă crește.

Minimul uzurii relative determinat de viteza de avans asigurată prin presiunea dintre obiectul supus prelucrării și discul metalic din OL 37 în mișcare de rotație este o consecință a echilibrului “dimensional” între cele două microsurse electrotermice respectiv dintre microsursele termice și cele mecanice de îndepărtare de material.

Influența acestor echilibre a fost analizată în cadrul cercetării productivității. Și la nivelul OT se vor putea constata variații asemănătoare, dar procentul mai redus și în consecință uzura relativă prezintă un minim.

În ceea ce privește viteza relativă se poate identifica minimul uzurii relative la valori mici ale acestui parametru de reglare, după care creșterea uzurii relative este continuă.

Valorile mici ale vitezei relative conduc la creșterea duratei de existență a microsursei termice iar capacitatea de modificare a stării de agregare a unor microvolume de material crește în special la materialul obiectului supus prelucrării, rezultând o scădere a uzurii relative. După depășirea valorii optime uzura relativă crește odată cu creșterea vitezei relative, efecte motivate anterior la analiza influențelor în cazul experimentului de ordinul I.

Minimul uzurii relative constatat la variația debitului mediului de lucru își găsește motivia în corelarea acțiunii acesteia de concentrare energetică a microsurselor electrotermice, de evacuare a produselor eroziunii și de răcire a celor două obiecte aflate în interacțiune.

Și la analiza acestui parametru tehnologic, prin cercetarea influenței cumulate a factorilor de influență se pot obține informații tehnologice cu aplicabilitate imediată.

Se poate spune că minimele obținute reprezintă de fapt un optim de proces corelat cu productivitatea prelucrării maximă pentru același domeniu de valori și după cum se va constata ulterior cu calitatea suprafeței foarte bună pentru acest tip de proces tehnologic.

Reprezentările plane văzute prin curbe de nivel, se observă în figurile 7.46. ... 7.51.

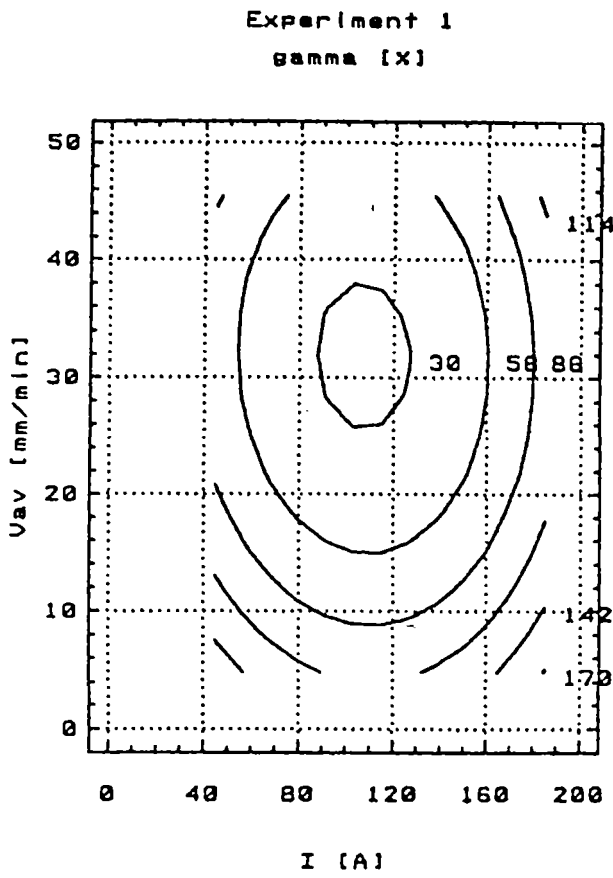


Fig. 7.46.

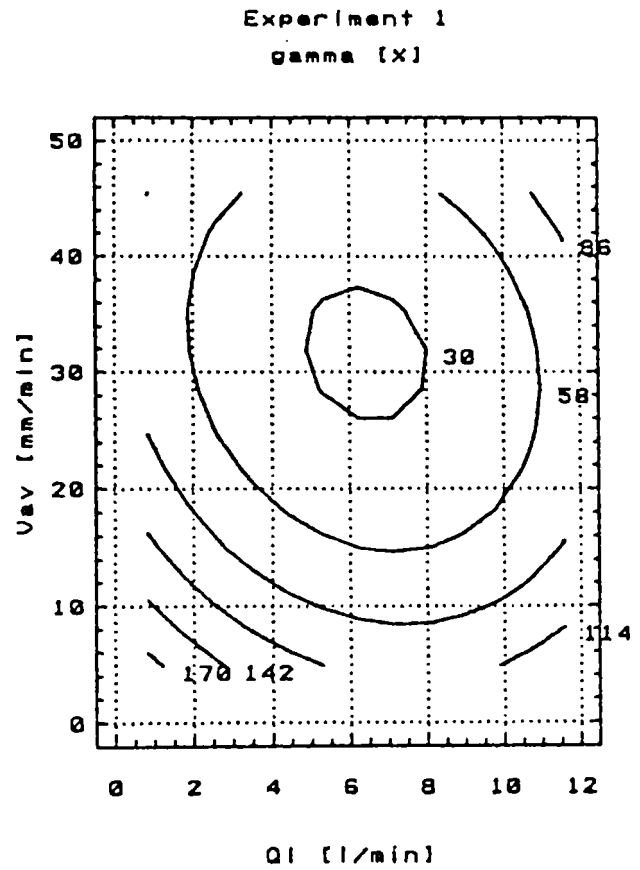


Fig. 7.47.

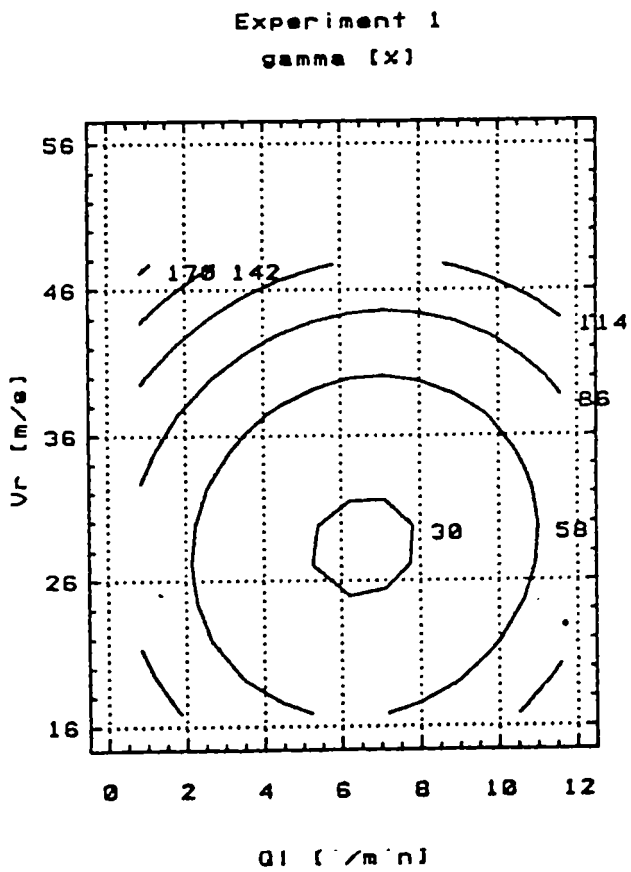


Fig. 7.48.

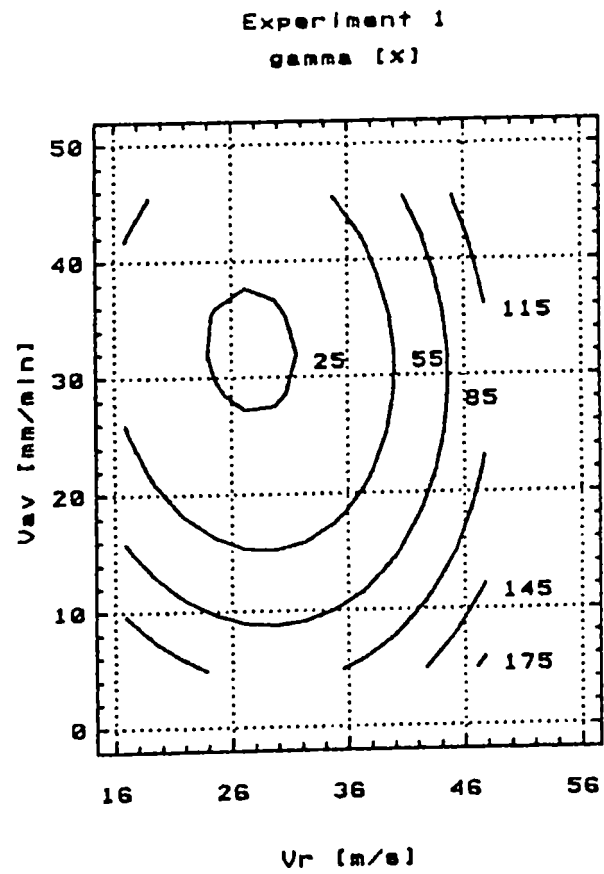


Fig. 7.49.

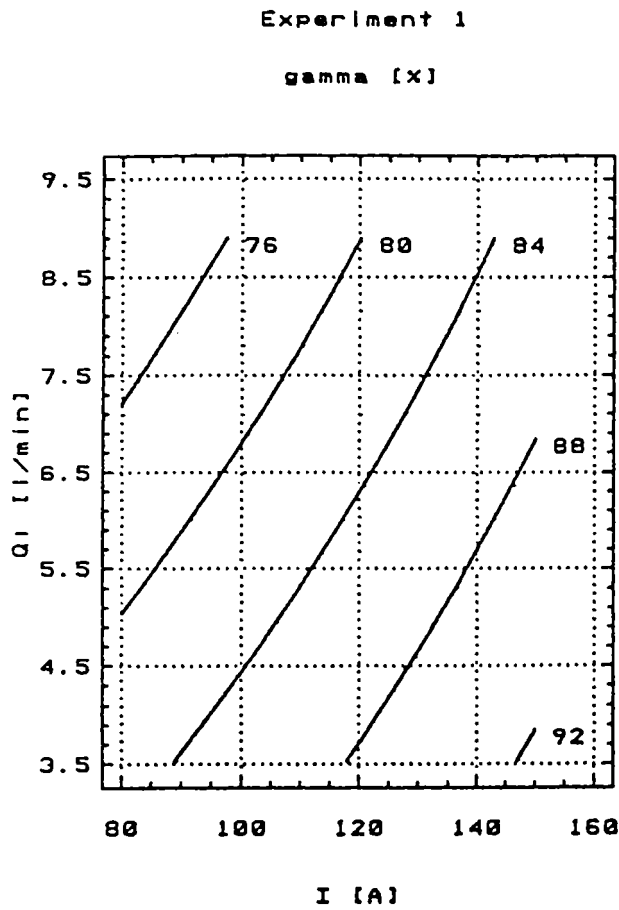


Fig. 7.50.

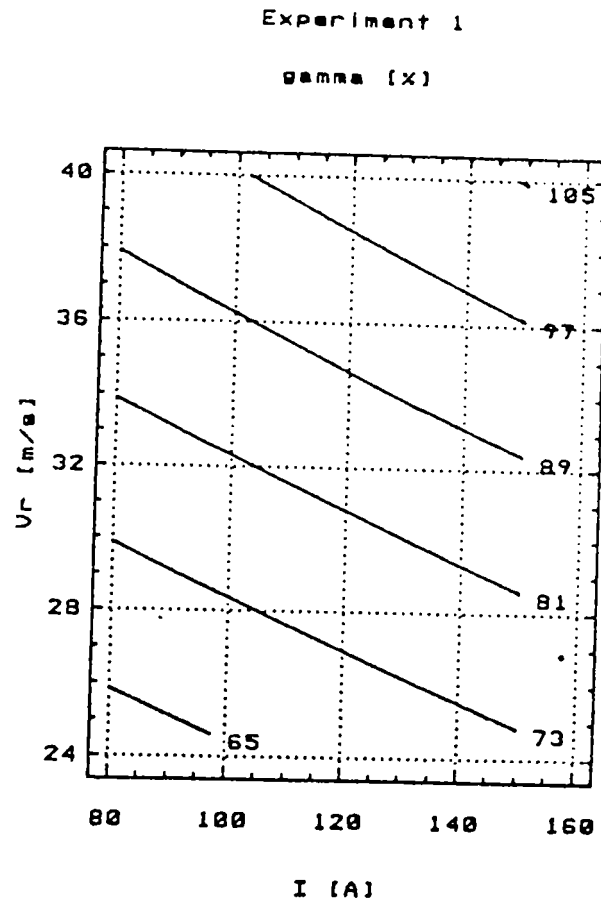


Fig. 7.51.

Pentru diferite valori numerice experimentale, se poate obține un minim al uzurii relative care reprezintă optimul dorit, adică acest lucru se poate întâmpla concomitent cu o productivitate “relativ maximă” și o calitate a suprafeței prelucrate bună.

“Cuburile tehnologice” care au rol de a explicita valorile considerate a fi importante din punct de vedere tehnologic sunt prezentate în figurile 7.52. și 7.53.

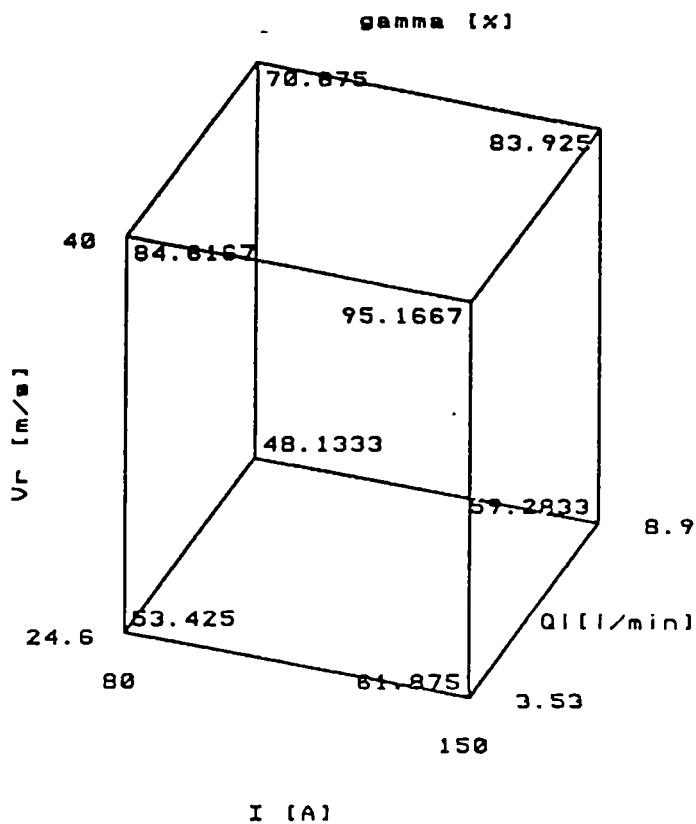


Fig. 7.52.

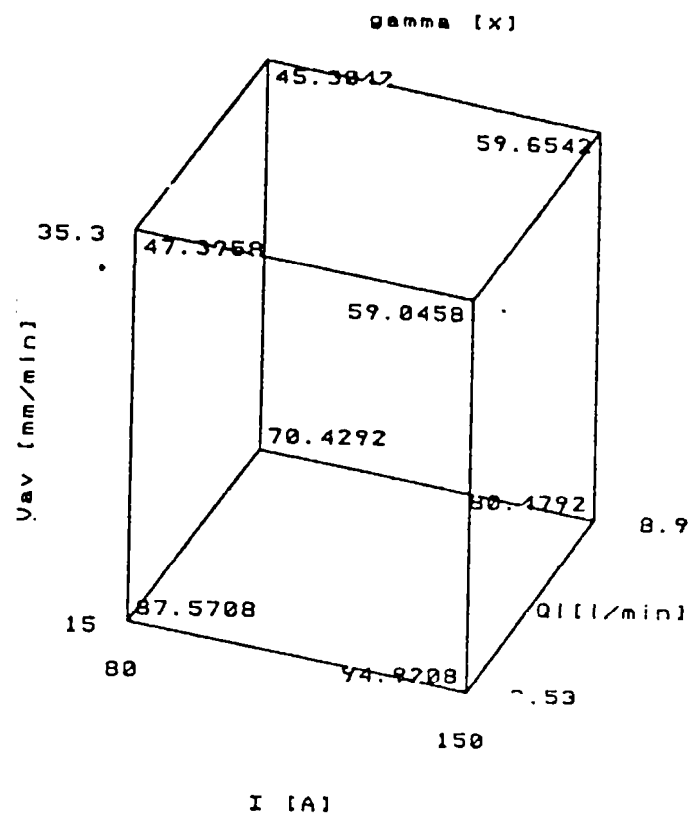


Fig. 7.53.

În figura 7.52. sunt exprimate valorile experimentale de interes tehnologic pentru funcția obiectiv uzura relativă, funcție de viteza relativă, intensitatea curentului electric și debitul de lichid. Iar în figura 7.53 sunt exprimate deasemenea câteva regimuri experimentale pentru funcția obiectiv uzură relativă funcție de viteza de avans, intensitatea curentului electric și debitul de lichid.

Evoluția uzurii relative ca și funcție obiectiv conduce la concluzia că rezultatele obținute sunt remarcabile.

Din analiza graficelor spațiale se poate spune că alegerea unei viteze de avans cuprinsă între 35-45 mm/min și respectiv impunerea pe cât posibil a unei viteze relative cuprinsă între 16-36 m/s dar și a unui debit de aproximativ 4-8 l/min, va conduce la o uzură minimă a procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și aliajelor sale.

7.6. Rugozitatea suprafeței prelucrate.

Analiza rugozității suprafețelor rezultate în urma debitării prin E.E.R.C. a aluminiului și a aliajelor lui trebuie privită atât sub aspect macroscopic cât și la nivel al microgeometriei.

Analiza macroscopică a suprafeței obținută în urma debitării conduce la constatări asemănătoare cu cele de la debitarea prin E.E.R.C. a oțelurilor. [85]. Se constată o variație macroscopică și implicit microscopică a aspectului macrostructural al suprafeței în dependență cu direcția de acțiune a obiectului de transfer (direcția de avans). În zonele de început a prelucrării

suprafața debitată are un aspect mai “lucios” în comparație cu zona de ieșire a OT unde suprafața prezintă mult mai evidente zone cu material resolidificat. Totuși în comparație cu suprafețele debitate în obiecte de prelucrat din oțel diferențele sunt mult mai mici, probabil și din cauză că resolidificările pe suprafața obiectului de prelucrat sunt influențate de afinitatea mare a aluminiului față de oxigen, cu formarea “instantanee” a unor pelicule care se opun aderenței.

S-a admis că pentru analiza microgeometrică **abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate R_a [μm]** poate caracteriza cel mai bine **calitatea suprafeței** prelucrate respectiv debitate la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a aliajelor sale. Din punct de vedere microgeometric trebuie remarcat faptul că valorile rugozității exprimate prin R_a sunt suficient de mici, fapt care asigură, în anumite condiții, utilizarea obiectului supus debitării și fără prelucrări ulterioare. Evoluția **abaterii medii aritmetice a profilului de rugozitate R_a [μm]** este diferită și anume poate fi funcție de programul experimental utilizat (funcție de regimul de lucru folosit). Se observă că, pentru un program experimental de ordinul I, **abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate R_a [μm]** (figurile 7.54., 7.58.) are un minim pentru diferite valori ale parametrilor de intrare și anume:

- dacă $I=138[\text{A}]$, $Q_f=8.5 [\text{l/min}]$;
- dacă $I=138[\text{A}]$, $v_f=26 [\text{m/s}]$;
- dacă $I=138[\text{A}]$, $v_{av}=15 [\text{m/s}]$.

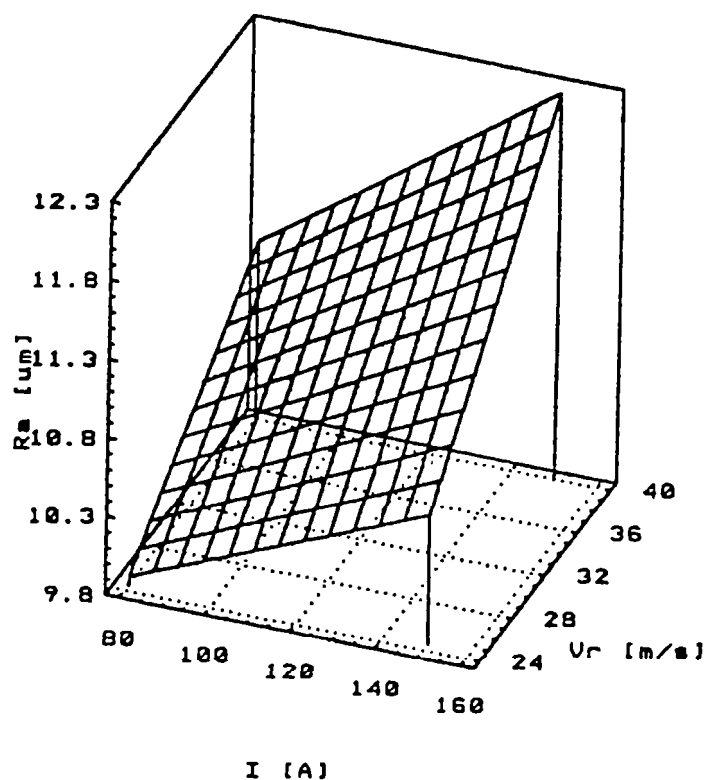


Fig. 7.54.

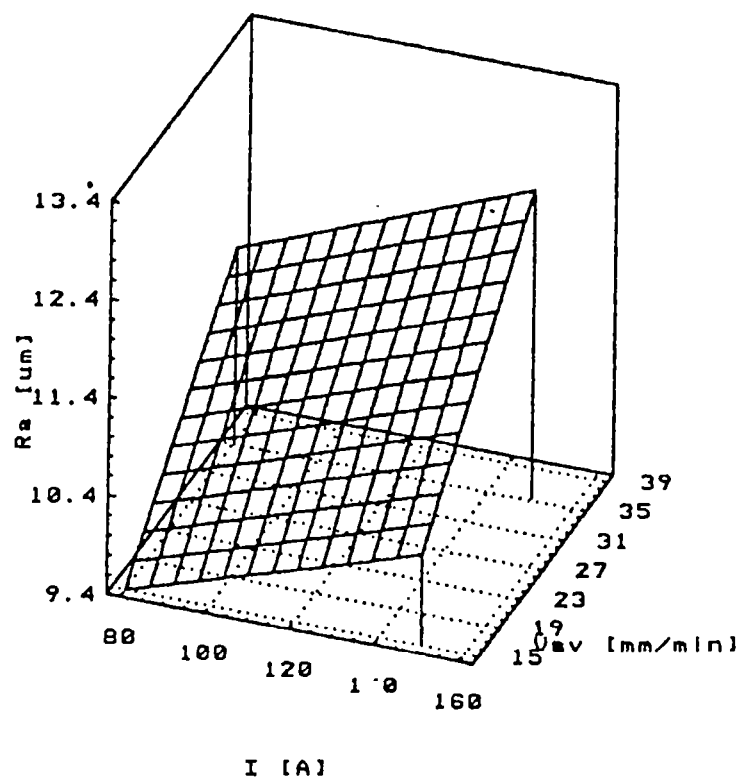


Fig. 7.55.

Cu excepția debitului de lichid care alimentează spațiul de lucru, care determină scăderi ale rugozității R_a odată cu creșterea lui, ceilalți parametri reglabili, intensitatea curentului electric, viteza de avans și viteza relativă conduc la creșteri ale lui R_a odată cu creșterea lor.

Creșterea intensității curentului din spațiul de lucru, creștere simultană cu creșterea intensității surselor elementare electro termice, din proces fac ca volume tot mai mari de material la suprafața obiectului supus prelucrării (evident și la suprafața OT) să fie aduse în stare de topitură (sau vapori) și în acest fel craterele formate vor fi mai mari (implicit și mai adânci) și astfel rugozitatea crește.

Creșterea rugozității cu creșterea vitezei de avans-adică cu creșterea presiunii de contact poate fi motivată pe de-o parte prin faptul că o creștere a presiunii determină deformații elasto-plastice mai mari la nivelul microasperităților ceea ce conduce la o mărire a suprafeței elementare în contact, iar pe de altă parte rezistența de contact scade prin asigurarea unui contact mai bun. În ansamblu o cantitate de energie elementară crescătoare acționează pe microsuprafețe din ce în ce mai mari și astfel craterele care se formează vor fi tot mai mari, rezultând în final abaterea medie aritmetică a profilului de rugozitate, R_a , din ce în ce mai mare.

Cu toate că creșterea vitezei relative poate intensifica mecanismele elementare de îndepărtare de material pe cale mecanică cu efecte favorabile asupra rugozității se constată că în ansamblu creșterea ei conduce la creșteri ale rugozității R_a .

Cum acest parametru de reglare este cauza și factorul determinant pentru localizarea temporară a microsurselor termice – efect Joule-Lentz și arc electric nestaționr-rezultă că prin reducerea timpului sunt reduse atât durata microcontactului nemijlocit cât și durata descărcării în arc. Probabil că în aceste condiții factorul principal de îndepărtare de material devine tot mai mult, odată cu creșterea vitezei relative, descărcarea în arc electric nestaționar care datorită concentrării puternice conduce la transmiterea unei cantități de căldură mari într-un timp din ce în ce mai mic, astfel posibilitatea pieredilor de căldură prin conducție (posibilitate mărită la obiectele de prelucrat din aluminiu și din aliajele lor) este continuu redusă. Astfel cantități de căldură tot mai mari acționează la suprafața OP, craterele cresc și abate medie geometrică a profilului de rugozitate crește.

Cum s-a mai menționat anterior, singurul parametru de reglare care are influența inversă asupra rugozității R_a adică creșterea lui conduce la scăderea rugozității este debitul de lichid care spală spațiul de lucru. Acest fapt poate fi motivat prin posibilitatea mărită de formare în spațiul liber dintre cele două obiecte în interacțiune a unor produse solidificate (mai mult mediu rece) care pot accentua abrazarea mecanică a suprafeței. Totodată ținând cont de interacțiunea interstițiului lateral creșterea cantității de lichid care traversează acest spațiu (spre deosebire de spațiul de lucru

echivalent cu cel frontal unde există contact nemijlocit) determină și o creștere cantitativă a unor produse solide care acționează pe cale mecanică asupra suprafeței scăzând astfel rugozitatea R_a .

Este important de subliniat că pentru valorile parametrilor de reglare luați simultan în calcul nu se poate obține un minim al **abaterii medii aritmetice a profilului de rugozitate R_a [μm]**.

Și în acest ultim caz programul experimental de ordinul I nu a răspuns cerințelor cercetării, deoarece adecvanța modelului nu a fost suficientă. Deci s-a apelat și de data aceasta la un al doilea program experimental de ordinul al doilea, factorial central compus complet. Acesta a corespuns din punct de vedere statistic foarte bine asigurând o precizie și o adecvanță foarte bună a modelului.

Astfel în figurile 7.59. - 7.64. se prezintă evoluția **abaterii medii aritmetice a profilului de rugozitate R_a [μm]** la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a aliajelor sale.

Prin această facilitate experimentală s-au putut identifica valorile parametrilor de reglare, care conduc la valorile minime ale abaterilor mediei aritmetice a profilului de rugozitate R_a [μm].

De remarcat că domeniile de "optim" pentru valorile rugozității în sensul minimizării ei, corespund întru totul valorilor care determină concomitent maximizarea productivității și minimizarea uzurii relative.

Și în cazul acestui parametru tehnologic –rugozitatea suprafeței R_a - analiza cumulată a influenței simultane a doi parametri conduce la identificarea unor valori certe care să corespundă din punct de vedere aplicativ.

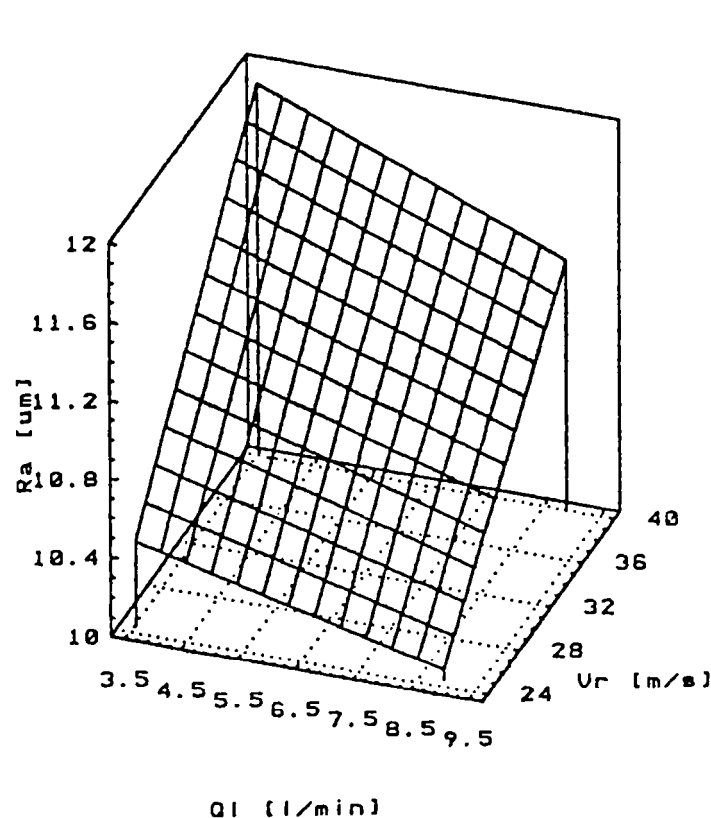


Fig. 7.56.

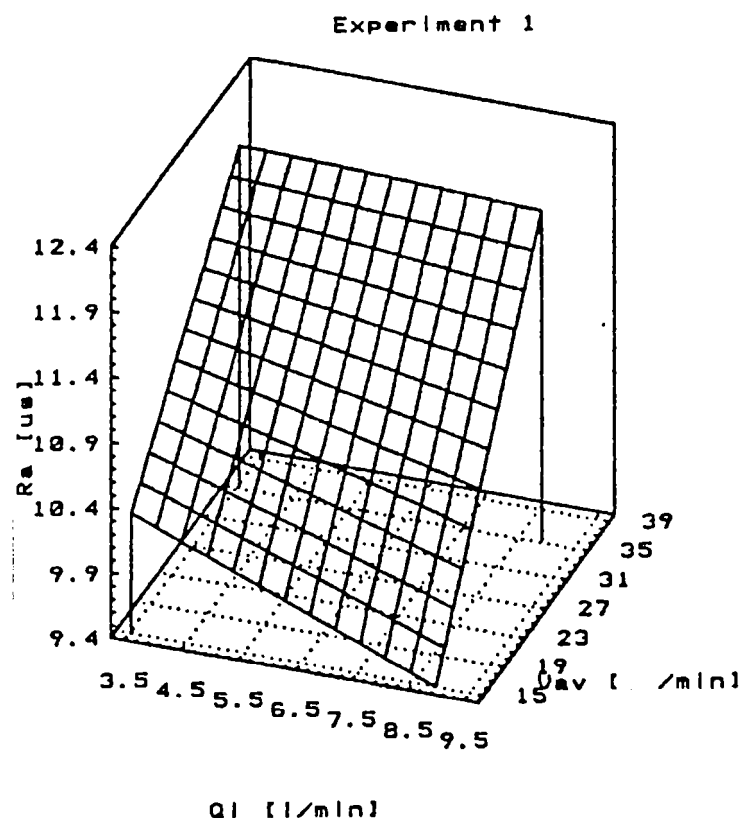
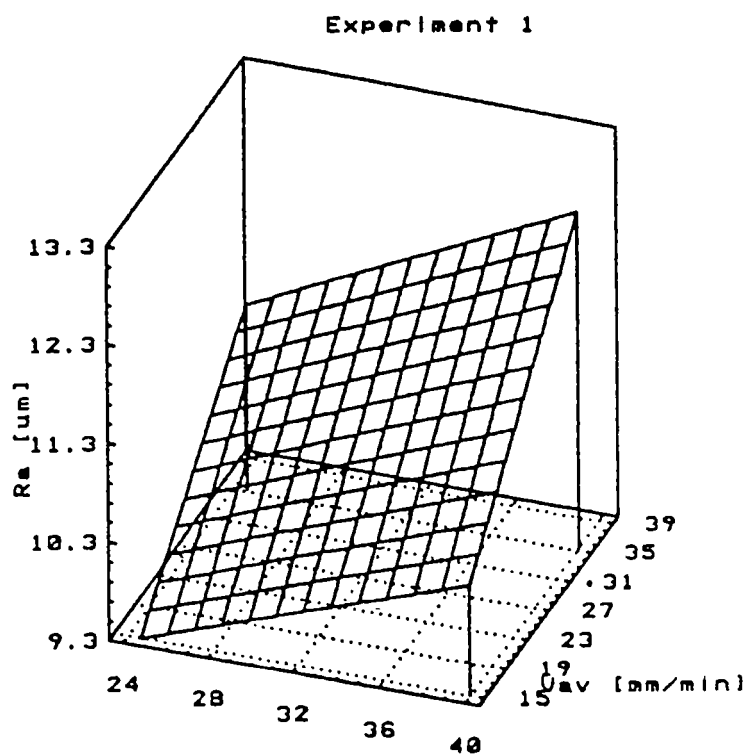
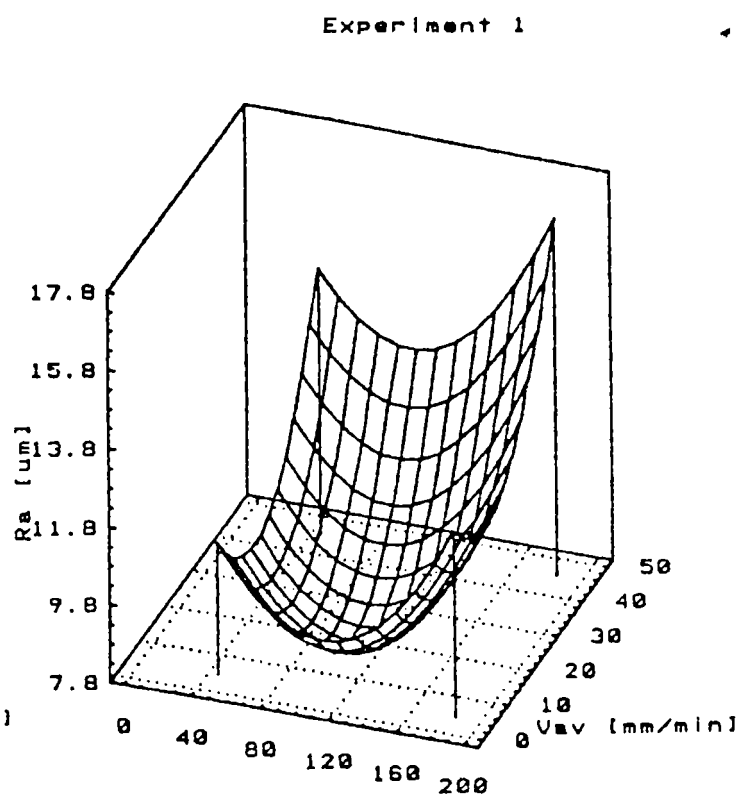


Fig. 7.57.



V_r [m/s]

Fig. 7.58.



I [A]

Fig. 7.59.

Reprezentările plane văzute prin curbe de nivel, se observă în figurile 7.65. ... 7.70.

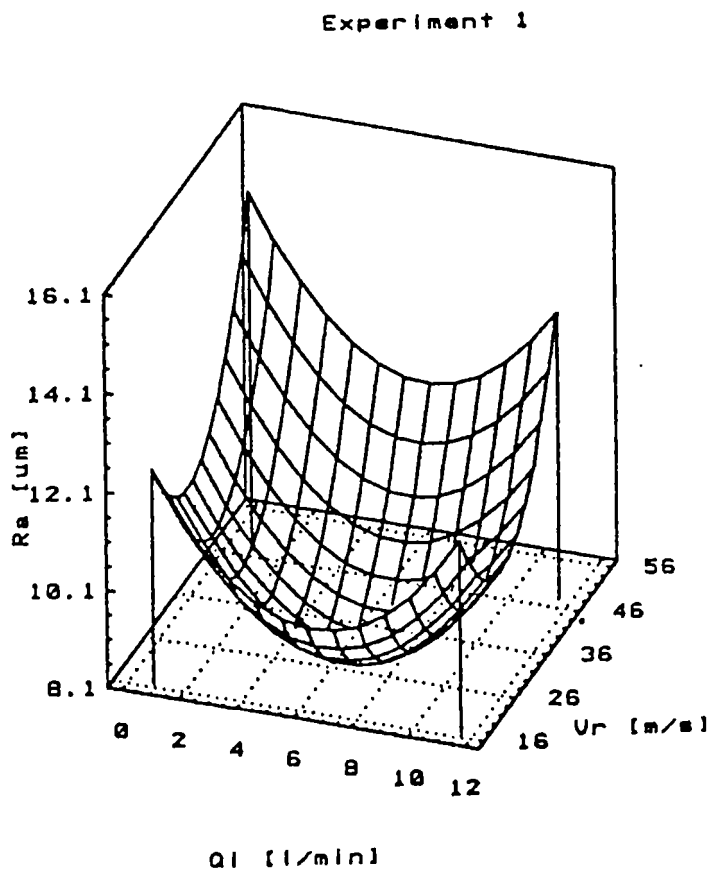


Fig. 7.60.

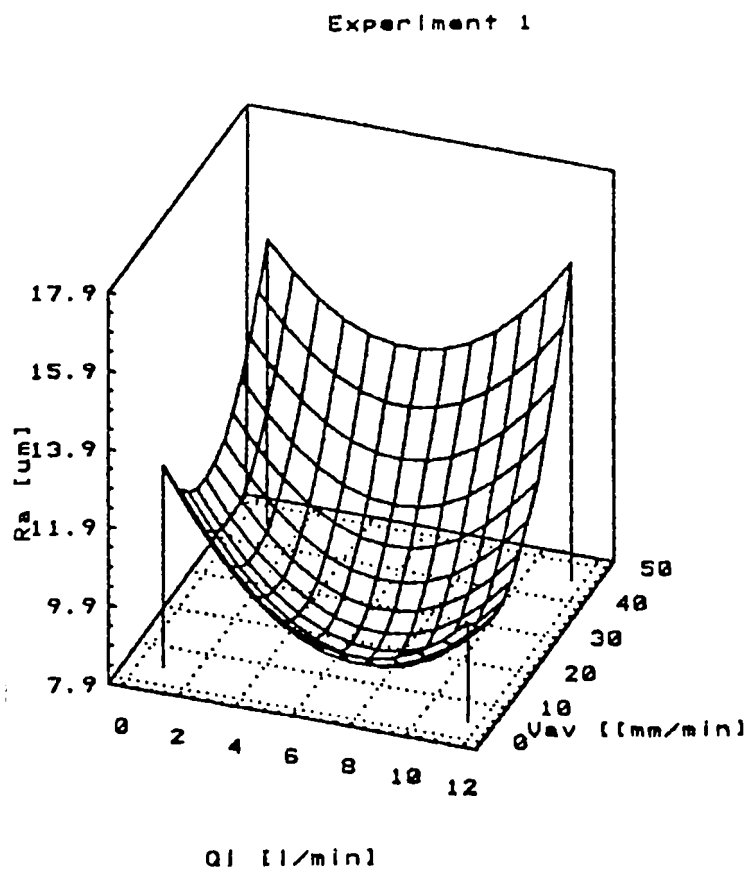


Fig. 7.61.

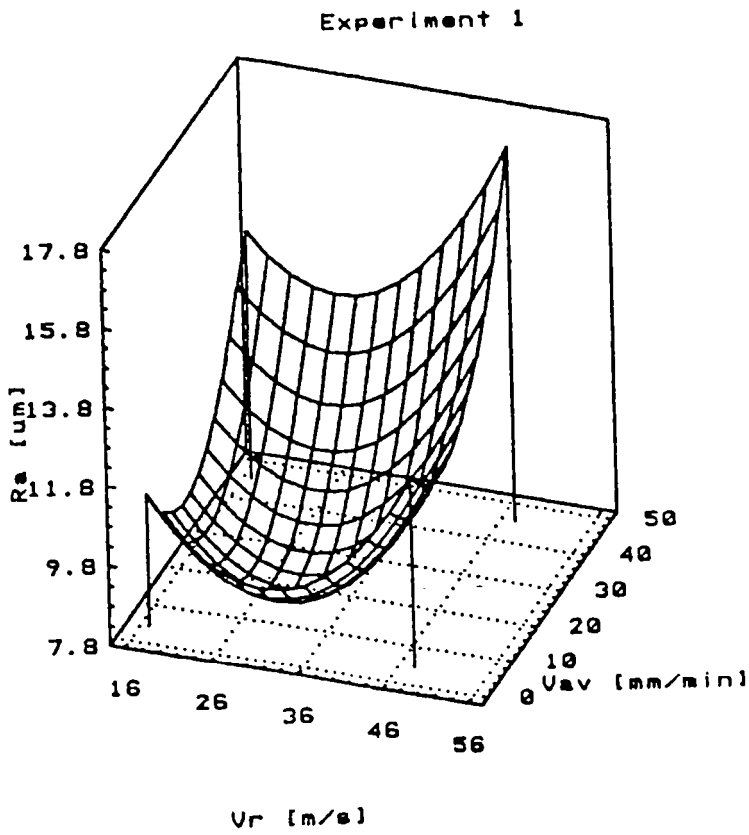


Fig. 7.62.

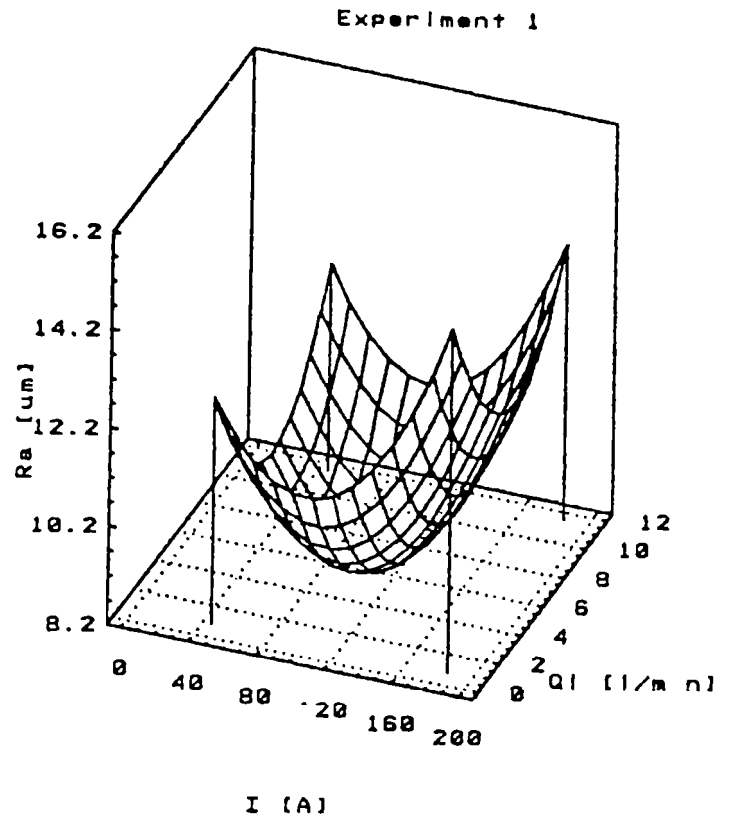


Fig. 7.63.

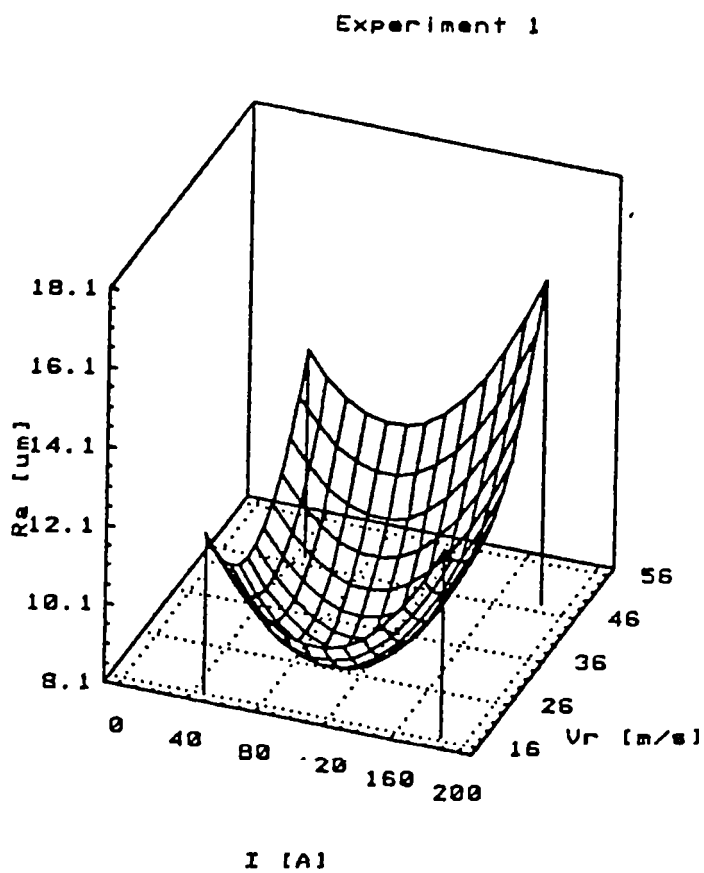


Fig. 7.64.

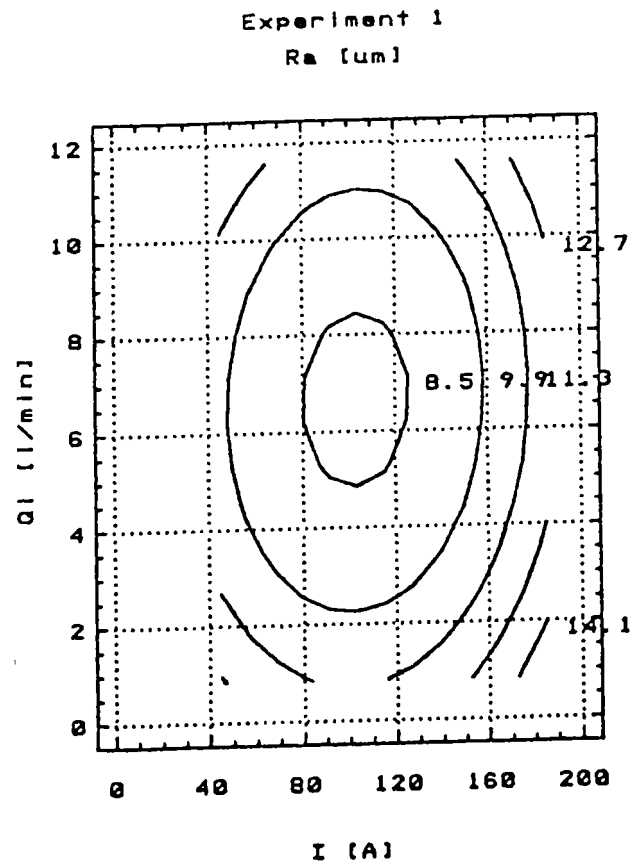


Fig. 7.65.

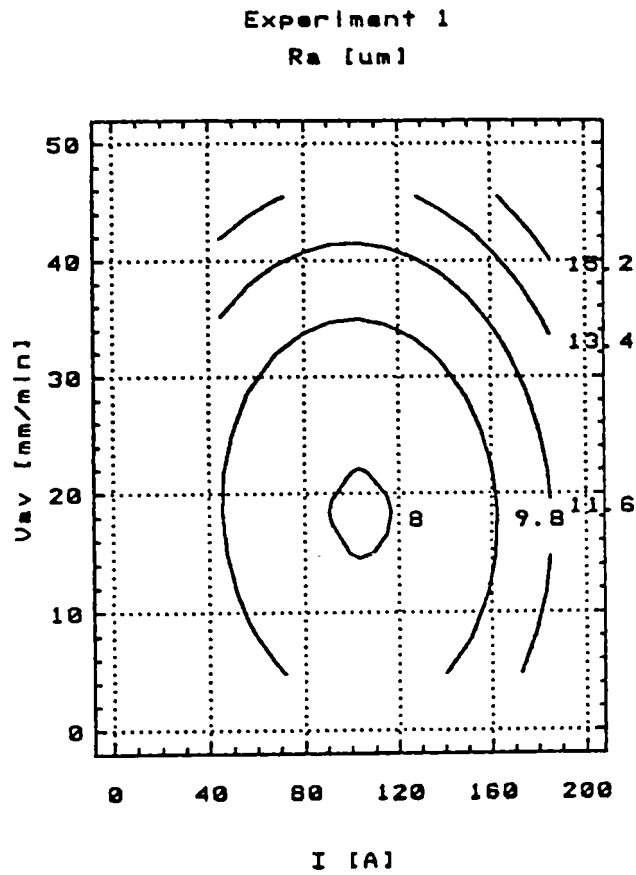


Fig. 7.66.

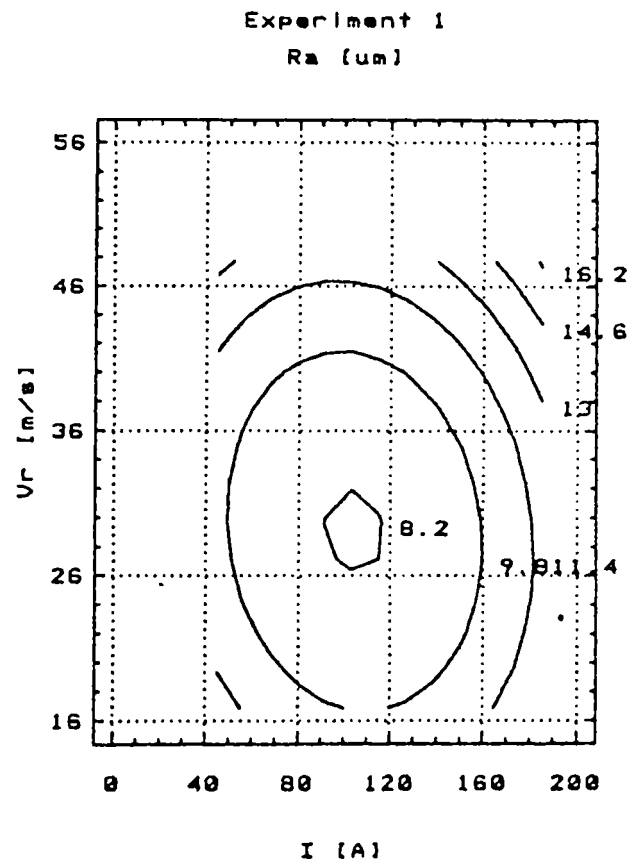


Fig. 7.67.

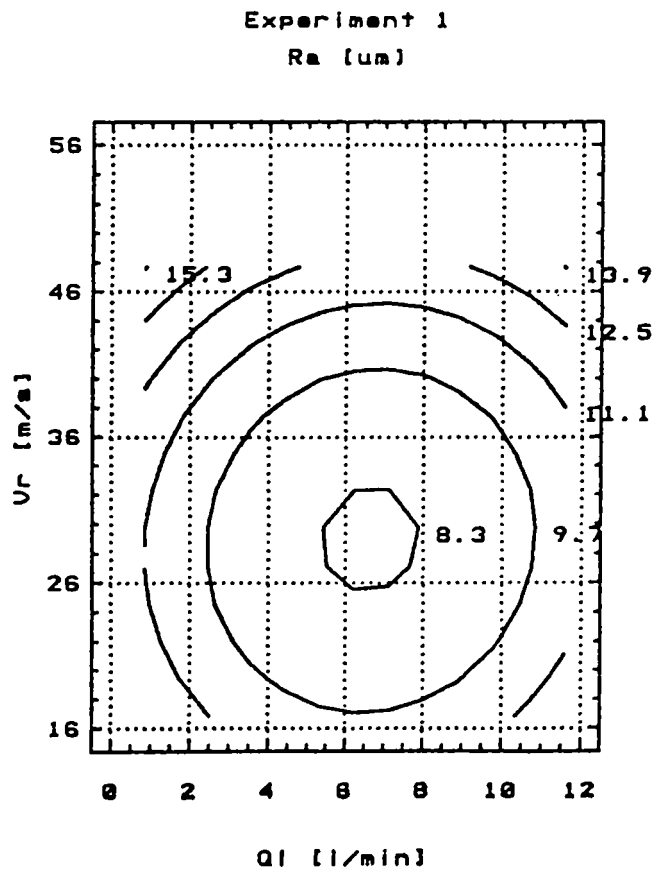


Fig. 7.68.

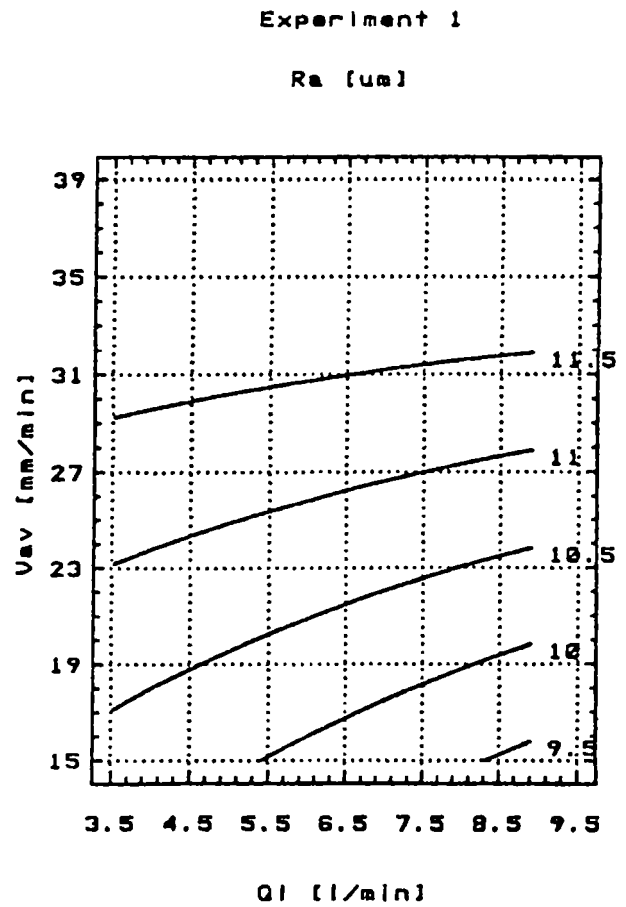


Fig. 7.69.

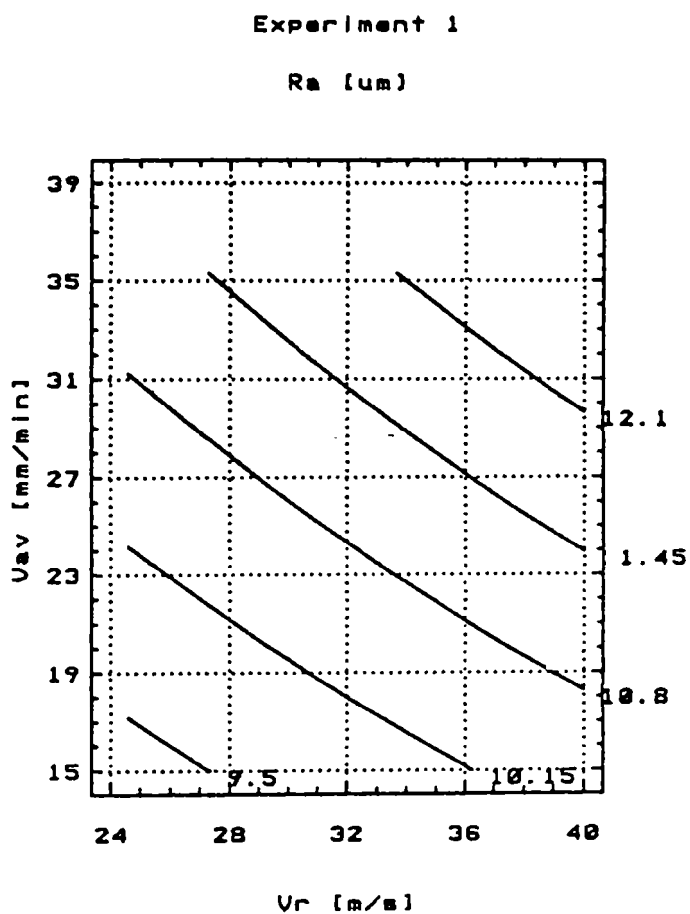


Fig. 7.70.

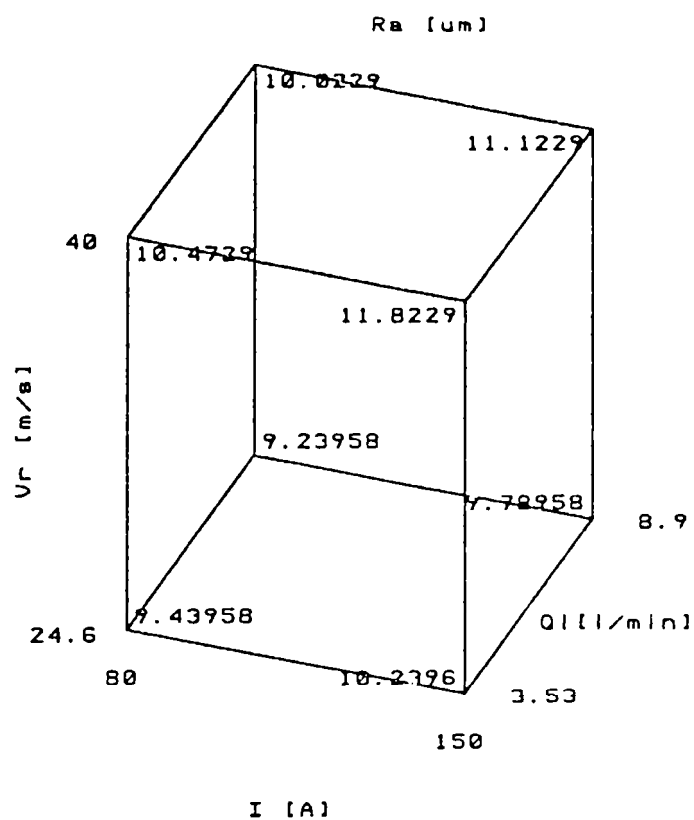


Fig. 7.71.

Un exemplu elocvent de “Cub tehnologic” este prezentat in figura 7.71.



8. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.

Prezenta teză de doctorat și-a propus să valideze utilizarea unui procedeu neconvențional de debitare a materialelor - eroziune electrică cu rupere de contact (E.E.R.C.) la debitarea aluminiului și a aliajelor lui și să identifice domeniile optime de variație ale parametrilor de reglare.

Cercetările și studiile realizate conduc la concluzia că debitarea aluminiului și a aliajelor lui este posibilă prin E.E.R.C. asigurându-se atât avantaje tehnologice cât și economice. Studiile teoretice întreprinse au conturat pe de-o parte aspecte cu caracter general asupra prelucrării prin eroziune electrică prin analiza comparativă a normelor tehnice cu privire la acest procedeu, iar pe de altă parte a încercat să fundamenteze anumite afirmații acceptate până acum ca adevărate în ceea ce privește prelucrarea prin E.E.R.C.

Pentru studiile experimentale aplicative s-a recurs la un mijloc de cercetare deosebit de eficient-programe experimentale de tip activ cum ar fi experimentul factorial de ordinul II complet central compus, folosind softuri "STATISTIC DATA SISTEM 2000", care au permis în final și să se identifice principalii parametri de reglare și domeniile de variație a lor care să conducă la

extremizări adecvate ale parametrilor tehnologici (maximizări ale productivității prelucrării și minimizări ale uzurii relative, respectiv ale rugozității suprafețelor rezultate în urma debitării).

Prin aplicarea E.E.R.C. la debitarea aluminiului și aliajelor sale a fost eliminat inconvenientul prelucrărilor convenționale (așchiere) de instabilitate a procesului datorită depunerilor pe tăiș, cu influențe mari asupra instabilității tuturor elementelor sistemului tehnologic.

Pe parcursul lucrării au fost prezentate concluzii referitoare la toate aspectele abordate atât în cercetarea teoretică cât și în cea aplicativă. Din acest motiv în continuare vor fi punctate doar cele mai importante concluzii de ordin general și de ordin particularizat respectiv vor fi enumerate principale aspecte de originalitate, aspecte care vin să completeze sistemul informațional teoretic și aplicativ al prelucrărilor prin E.E.R.C.

8.1. Concluzii principale.

Procedeu de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact este un procedeu caracterizat printr-o productivitate a prelucrării deosebit de mare, în special atunci când se materializează prin acțiuni asupra unor suprafețe și arii mici. În aceste condiții viteza de avans acceptată de proces este ridicată, situație care direcționează aplicarea eroziunii electrice cu rupere de contact spre operațiile de debitare.

În urma efectuării analizelor din prezenta lucrare au putut fi formulate câteva precizări:

- ◆ Terminologia caracteristică utilizată pentru domeniul prelucrărilor prin eroziune electrică este normalizată atât în România cât și în Germania, dar între cele două norme pot fi identificate diferențe, uneori chiar substanțiale. O primă remarcă foarte importantă pentru privirea de ansamblu asupra metodei de prelucrare prin eroziune constă în lipsa menționării eroziunii electrice cu rupere de contact, ca variantă a prelucrării prin eroziune electrică în normele românești și definirea incompletă (poate chiar incorectă) a acestui procedeu în normele germane.
- ◆ O altă concluzie importantă rezultată ca urmare a comparării celor două norme este cea referitoare la explicitatea lor. Norma din România este sumara, lapidară chiar dacă în ansamblu clară în timp ce normele germane prezintă eroziunea electrică într-o formă largă cu foarte multe

figuri exemplificative și eximplicative, cu clasificări și subclasificări care oferă o imagine elocventă asupra procedului.

- ◆ Cum desfășurarea mecanismelor elementare de îndepărtare de material la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact este dependentă de o mișcare relativă între obiectul supus prelucrării și obiectul de transfer, fără ca să se impună restricții acestei mișcări relative ci numai încadrarea ei între anumite valori caracteristice, se determină o multitudine de variante de aplicare a procedului, dar așa cum s-a arătat mai sus aplicația cu cea mai mare eficiență tehnico-economică este debitarea.
- ◆ La prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact, îndepărtarea de material are la bază mecanisme elementare de natură termoelectrică și de natură mecanică.

Mecanismele de natură termoelectrică sunt principalele cauze care asigură desfășurarea proceselor și conduc în principal la îndepărtarea de material. Dintre acestea locul principal îl ocupă mecanismul dezvoltării de căldură în microcontacte electrice dintre microproeminențele obiectului supus prelucrării și microproeminențele obiectului conjugat. Aceste contacte electrice nemijlocite conduc pe de-o parte la dezvoltarea de căldură prin efectul Joule-Lenz, la trecerea curentului prin rezistența de trecere R_t formată la nivelul microcontactului, iar pe de altă parte ele devin la sfârșitul perioadei lor de existență cauze care asigură amorsarea microarcelor electrice nestaționare.

S-a putut dovedi că rezistența de trecere formată la nivelul unui microcontact este dependentă exclusiv de proprietățile materialului din care este confecționat obiectul asupra căruia se îndreaptă atenția (OP sau OT)

S-a putut dovedi de asemenea că atât durata de existență a microcontactelor electrice cât și durata de existență a microarcelor electrice se situează în limita duratelor de desfășurare a proceselor tranzitorii determinată de aceste surse electrotermice și ca urmare efectele lor pot fi asimilate cu efecte dezvoltate de impulsuri electrice, cu consecințele tehnologice benefice ale acestora.

Mecanismele de natură mecanică care se pot desfășura în spațiul de lucru dintre obiectul supus prelucrării (OP) și obiectul care asigură localizarea spațială a prelucrării (OT) sunt de mai multe feluri, în dependență directă de situația concretă și aleatoare în care se află microproeminențele celor două obiecte în interacțiune. Ele pot fi mecanisme cu acțiuni similare prelucrărilor prin abraziune, mecanisme cu acțiuni mecanice la adeziune respectiv mecanisme cu acțiuni mecanice de forfecare.

- ◆ Utilajele care se află la ora actuală în utilizare pot fi grupate în trei mari categorii prezentate cu suficiente detalii în lucrare și au în componența lor subsisteme specifice cinematicii necesare desfășurării procesului eroziv. Unele dintre aceste subsisteme sunt proprii acestui procedeu de prelucrare cu toate că pot fi întâlnite și în alte domenii și zone tehnologice.

La conceperea utilajelor pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact trebuie parcurse etapele specifice proiectării oricărui utilaj tehnologic cu precizarea ca aspectul tehnico-economic primordial pentru concepție poate căpăta o formă specifică prelucrărilor neconvenționale.

În cadrul acestei prelucrări s-a impus forma de exprimare a productivității prelucrării prin raportul volumului de material îndepărtat la suprafața obiectului supus prelucrării (similar pentru uzura volumică) în unitatea de timp. Dacă se acceptă o discretizare a prelucrării, în sensul admiterii, unei îndepărtări secvențiale de material (fie la nivelul obiectului prelucrării, fie la cel al obiectului de transfer) productivitatea (sau uzura) poate fi exprimată prin aria unei "secvențe" îndepărtată cu anumită viteză. În acest fel este subliniată importanța mare pe care o capătă viteza liniară cu care se îndepărtează secvența (o fișie îngustă a cărei formă este dependentă în special de forma și dimensiunile OP respectiv de dimensiunile OT. Prin aceasta este subliniat principalul domeniu de aplicare al eroziune electrică cu rupere de contact și anume debitarea materialelor metalice, unde factorul economic principal este timpul.

- ◆ Din ansamblul factorilor de reglare (parametrii independenți) ai procesului de prelucrare prin eroziune electrică destinat debitării aluminiului și aliajelor lui principalii factori sunt: viteza de avans (presiunea), intensitatea curentului electric, viteza relativă și debitul de lichid cu care se alimentează spațiul de lucru.

Pentru intensitatea curentului electric au fost identificate valori relativ mici (100..150 A) care asigură extremizări ale funcțiilor obiectiv analizate (productivitate uzură relativă, rugozitatea R_a). Acest fapt este o consecință directă a caracteristicilor termofizice favorabile în special a temperaturii de topire, proprie aluminiului și a aliajelor lui. Avantajul tehnologic al debitării aluminiului și a aliajelor lui prin E.E.R.C. constă tocmai în intensitatea mică a curentului necesară, care implică și consumuri energetice relativ reduse.

Cei trei factori de reglare care au mai fost analizați la debitarea prin E.E.R.C. a aluminiului și a aliajelor lui conduc la optimizări ale funcției obiectiv pentru valori în același domeniu de variație ca și în cazul debitării semifabricatelor din oțel, sublinind astfel desfășurarea unor mecanisme elementare identice la debitarea celor două materiale.

Rugozitatea suprafețelor debitate prin E.E.R.C este situată la valori exprimate fizic prin rugozitatea R_a , care , în anumite situații concrete de aplicare industrială pot fi utilizate direct fără prelucrări ulterioare. Valorile minime ale rugozității sunt determinate în același domeniu de variație care asigură o maximizare a productivității corelată cu o minimizare a uzurii relative:

- ◆ În ansamblu se poate afirma că eroziunea electrică cu rupere de contact este un procedeu care aplicat la debitarea aluminiului și a aliajelor lui poate asigura o eficiență tehnologică ridicată. Corelând aceasta cu complexitatea redusă a utilajului și cu exploatarea ușoară a lui (se pot asigura și condiții sociale de lucru corespunzătoare) rezultă că procedeu este unul dintre cel mai adecvate procedee de debitare a aluminiului și a aliajelor lui.

8.2. Contribuții originale.

Pe parcursul elaborării lucrării, în timpul cercetărilor teoretice și experimentale au fost întâlnite situații la care literatura de specialitate nu a dat încă răspunsuri bine conturate și justificate. Au fost întâlnite și situații când din motive de diferite naturi a fost necesară găsirea unor căi și mijloace inedite noi. Aceste situații cât și mulți alți factori de influență au determinat dezvoltarea unor păreri, conturări, explicitări și exprimări a unor contribuții originale dintre care principala este:

- justificare teoretică și experimentală cu privire la debirtarea prin eroziune electrică cu rupere de contact a aluminiului și a aliajelor lui și validarea acestui procedeu ca unul cu eficiență tehnologică ridicată în această aplicație.

Pe lângă această cotribuție originală mai pot fi amintite și unele din domeniile cercetării teoretice și aplicative după cum urmează:

În domeniul cercetărilor teoretice.

- ◆ efectuarea unui studiu comparativ între normele de aplicarea a eroziunii electrice din România și Germania și sublinierea unor neconcordanțe între cele două norme;

- ◆ echivalarea spațiului de lucru cu un număr “n” de rezistențe care prin conectarea lor în paralel asigură desfășurarea mecanismelor elementare, concomitent în mai multe puncte, repartizat aleator în spațiul de lucru;
- ◆ determinarea pe cale teoretică cu verificări practice asupra unor cazuri concrete prezentate în literatura de specialitate a rezistenței de trecere R_t care ia naștere la formarea microcontactelor. Valoarea acestei rezistențe exprimate atât pentru cazul contactului individual cât și pentru ansamblul microcontactelor la un moment dat este o mărime dependentă de proprietățile fizice ale materialului și de parametrii de reglare care asigură desfășurarea procesului;
- ◆ localizarea temporară a efectului Joule-Lenz prin determinări ale timpului de existență a microcontactelor. S-a putut dovedi că acest timp se situează în domeniul zecilor de microsecunde. Cu aceste valori și cunoscând valori practice ale parametrilor de reglare a fost posibilă identificarea temperaturilor dezvoltate care la nivelul unui microcontact s-a obținut valori ale temperaturilor care depășesc cu mult valoarea temperaturii de topire a oțelului.
- ◆ pornind de la neconcordanța privind definiția procedurii de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact existentă în normele Germane VDI s-a calculat durata de existență a arcului electric care se formează la ruperea microcontactelor electrice. Valorile obținute situează aceste descărcări în domeniul descărcărilor nestaționare. Prin aceste două localizări temporare s-a putut demonstra caracterul de impuls al surselor termice din spațiu de lucru cu consecințele favorabile asupra concentrării energetice

În domeniul cercetărilor aplicative.

- ◆ sistematizarea unor priviri de ansamblu asupra tuturor variantelor de utilaje de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact indiferent dacă sunt standuri de laborator sau utilaje cu destinație distinctă.
- ◆ sistematizarea posibilităților constructive ale subansamblelor specifice utilajelor de prelucrare prin E.E.R.C. Din analizele efectuate în cadrul literaturii de specialitate care prezintă aceste utilaje au rezultat pe de-o parte subansamblele specifice care pot, dar nu

toate trebuie să intre în componența unui astfel de utilaj și diferite construcții constructive mai mult sau mai puțin particulare normale pentru aceste subansamble.

- ◆ Admiterea unui aspect secvențial de îndepărtare de material la nivelul OP, considerând existența unor straturi succesive cu o formă dependentă de forma și dimensiunile obiectului supus prelucrării și de dimensiunile obiectului de transfer care se îndepărtează succesiv cu anumită viteză liniară identificabilă cu o viteză de avans a OT.

Datorită acestui punct de vedere a putut fi motivată obiectiv direcționarea procedurii de prelucrare prin E.E.R.C. spre operații de debitare la care creșterea productivității (deci reducerea timpului de prelucrare) se poate realiza prin creșterea vitezei liniare de avans.

- ◆ Utilizarea unei metode de cercetare experimentală cu valențe deosebite, adaptate acestui moment - cercetare asigurată prin Pachetul de Programe "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" care a asigurat o privire de ansamblu a posibilităților tehnologice;
- ◆ Verificarea rezultatelor cercetării obținute pe calea menționată anterior au fost efectuate cu ajutorul softului consacrat "STATGRAPHICS" care a confirmat rezultatele obținute;
- ◆ Limitarea domeniilor de variație a principalilor parametri de reglare a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact-intensitatea curentului electric, viteza de avans (presiunea existentă în spațiul de lucru între cele două obiecte în interacțiune), viteza relativă dintre OT și OP și debitul cu care se spală spațiul de lucru la valori care să asigure extremizări în sensul dorit al funcțiilor obiectiv analizat-maximizarea productivității prelucrării și minimizarea uzurii relative și a rugozității suprafețelor obținute.

Se poate considera că această lucrare este o lucrare deschizătoare a unui nou drum în cercetarea prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact.

Așa cum s-a arătat la început lucrarea și-a propus exclusiv să valideze aplicarea acestui procedeu la debitarea aluminiului și a aliajelor lui fapt demonstrat prin întreaga cercetare efectuată.

Pentru continuarea cercetărilor se deschid noi cerințe și posibilități dintre care unele ar putea fi:

- ◆ **Determinări pentru identificarea limitelor dimensionale ale semifabricatelor debitate prin E.E.R.C., dar și corelarea dimensională între OT și OP;**

- ◆ **Determinarea influențelor pe care le au asupra procesului de prelucrare diferitele elemente care intră în compoziția chimică a diferitelor sorturi din cele trei grupe de aliaje de aluminiu;**

- ◆ **Identificarea ponderii pe care le au sursele termice de îndepărtare de material în comparație cu cele mecanice, ținând cont că la prelucrarea aluminiului și a aliajelor lui obiectul supus prelucrării prezintă proprietăți termofizice mult diferite de cele ale oțelului, material spre care au fost îndreptate până acum aproape exclusiv cercetările.**

Sindelfingen, Germania

ianuarie 2000



BIBLIOGRAFIE.

1. Andrașiu, M., Baci, Aurora, Pascu, Ana, Pușcaș, Elena, Tașnadi, Al. Metode de decizii multicriteriale. Editura Tehnică, București, 1986.
2. Antonescu, I., ș.a. Sudarea prin presiune. Editura Tehnică, București, 1969.
3. Babicov, M., A., Aparate electrice. Editura Tehnică, București, 1965.
4. Babicov, M., A., Aparate electrice de joasă tensiune. Editura Energetică, București, 1965.
5. Bain, A., M., ș.a. Dependența principalilor indicatori ai prelucrării prin electrocontact în funcție de materialul sculei și regimul tehnologic. În Elektronnaia obrabotka materilov. Nr. 3. URSS, 1983.
6. Balaban, Cornelia. Strategia experimentării și analiza datelor experimentale. Editura Academiei Române, București, 1993.
7. Baron, T. Metode statistice pentru analiza și controlul calității producției. Editura Didactică și Pedagogică, 1979.
8. Bădărău, E., Popescu, I. Descărcări electrice în gaze. Editura Tehnică, București, 1963.

9. Băilă, D., Nanu, D., ș.a. Stand experimental, cu obiect de transfer disc pentru debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. Tehnologii moderne, calitate, restructurare. Vol 3. Editura TEHNICA-INFO. Chișinău 1999.
10. Băilă, D. Contribuții la optimizarea constructivă a obiectelor de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact Teză de doctorat, Sibiu, 2000.
11. Berger, A. Elektrisch abtragende Fertigungsverfahren. VDI - Verlag Düsseldorf.
12. Bejar, M., A., Orellana, C., Electrocontact discharge grinding of cutting tool metals. În J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 24., Nr. 2., 1984.
13. Bejar, M., A. Electrocontact Discharge Trepanning of Metals. În: Journal of Materials Processing Technology. Nr.25. 1991.
14. Blezu, D., Nanu, D., ș.a. Metodă de estimare a numărului punctelor de contact și a celor de arc la prelucrarea prin EERC. Tehnomus, Suceava, 1985.
15. Braumann, P., Schröder, K. Kontaktwiderstand und Verschweisseinigung von Silber-Nickel und Sibel-Metalloxid. În: Elektrotechnik und Informationstechnik. Nr.107. 1990.
16. Bucur. V. Contribuții la optimizarea tehnologică la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC) cu obiect de transfer bandă metalică. Teză de doctorat, Sibiu, 1998.
17. Centea, O., Micloș, V., Mașini și aparate pentru sudarea electrică. Editura Tehnică București, 1967.
18. Chicea, O. Bazele teoretice ale prelucrării prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC). Referat I, Universitatea "Lucian Blaga" Sibiu, 1995.
19. Cicală, E. Optimizarea proceselor de tăiere conturată cu laser a metalelor. Teză de doctorat, Universitatea „Politehnica“, Timișoara, 1997.
20. Cicală, E. Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale. Editura Politehnică. Timișoara 1999.
21. Cicală E., Zsivanov D. La hierarchisation des facteurs d'influence proponderants de la largent du trait de coupe realise par des lasers CO₂ – CW. Buletin Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, fasc. 1, 1996.

22. Diaconescu, C., Nanu, D., Oprean, C., Țițu, M. Posibilități de reglare a parametrilor energetici pentru generatorul de impulsuri singulare la prelucrarea prin eroziune electrică. INGMEC 98, Craiova, 1998.
23. Diaconescu, C., Nanu, D., Oprean, C., Țițu, M. Echipament pentru generarea unor impulsuri pentru prelucrarea prin eroziune electrică. INGMEC 98, Craiova, 1998.
24. Domșa, A., Domșa, Ș. Materiale metalice în construcția de mașini. Editura Dacia. Cluj-Napoca 1981
25. Dumitrescu, E. Aluminiumul – metal al secolului XX. Editura Științifică. București 1967.
26. Dușe, D. Contribuții la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact. Teză de doctorat, Timșoara, 1991.
27. Dușe, D., Utilaje de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact, Referat I, Universitatea Politehnică Timișoara, 1987.
28. Enache, S., Proiectarea și tehnologia sculelor așchietoare. Editura Tehnică București, 1973.
29. Engelmann, B., ș.a. Schneiden mit Laserstrahlung und Wasserstrahlung. Anwendung, Erfahrung, Ausblick. Expert – Verlag. Esslingen.
30. Feurer, M. Elektroerosive Metallbearbeitung. Vogel-Buchverlag Würzburg, 1983.
31. Gavrițaș, I., ș.a. Prelucrări electrice în construcția de mașini. Editura Tehnică București, 1968.
32. Gavrițaș, I., Marinescu, N. Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini. Editura Tehnică, București, 1991.
33. Geru, N. Metalurgia fizică. Editura Didactică și Pedagogică. București 1981.
34. Heber, S., Stadiul actual al prelucrărilor cu descărcări electrice în construcția de mașini. Referat I, II, III, Universitatea Politehnică Timișoara, 1996, 1997.
35. Herbrich, H. Qualitative und wirtschaftliche Aspekte des Schneidens mit CO₂-Laser. Messer Griesheim-Sonderdruck 10/80. Frankfurt/Main.
36. Hortopan, Gh. Aparate electrice. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1984.
37. Hortopan, Gh. Aparate electrice de comutație. Editura Tehnică, București, 1993.
38. Hotărescu, O. Metalele în epoca actuală. Editura Albatros. București 1882.
39. Ilescu, C., Tureac, I., Gasper, L. Tehnologia debitării, decupării și perforării de precizie. Editura tehnică. București 1980.

40. Iuhvit, M.,E., Kravet, M.,T. Prelucrarea suprafețelor cilindrice prin contact electric. În:Stankii instrument. Nr.5, 1960.
41. Ispas, C., ș.a. Mașini-unelte. Elemente de structură. Editura Tehnică, București, 1997.
42. Joliet, H. Aluminium. Die ersten hundert Jahre. VDI Verlag.
43. Kammer, C. Aluminium – Taschenbuch. Band 1. Grundlagen und Werkstoffe. Aluminium – Verlag. Düsseldorf.
44. Kisilev, S.I. Instalație de prelucrare electrozivă. Brevet de invenție URSS 1602636.
45. König, W., Fertigungsverfahren Vol. II. – Schleifen, Honen, Lappen. Editura VDI, Dusseldorf, 1990.
46. König, W., Fertigungsverfahren. Band 3, Germania, 1995.
47. König, W., Jorres, L. Electro-Discharge Polishing as a Surface Finishing Process. Proceedings of International Synposium for Electro-Machining (ISEM-9), Nagoya, 1989.
48. Lebeder, V.M. ș.a. Turnarea pieselor din aliaje de aluminiu. Editura tehnică. București 1972.
49. Marinescu, R.D., Marinescu, N.I. Managementul Tehnologiilor Neconvenționale. Vol.I, Editura Economică, București, 1995.
50. Marinescu, N.I., Marinescu, R.D. Managementul Tehnologiilor Neconvenționale. Vol.II, Editura Economică, București, 1998.
51. Marinescu, N.I., Gavrițaș, I., Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini. Vol. II. Editura Tehnică. București, 1993.
52. Mărcușanu, A. Instalație automată de debitat capetele de la barele laminate prin eroziune electrică cu rupere de contact. CNTN 6, Timișoara, 1993.
53. Mărcușanu, A. Calculul elementelor implementate în instalația de debitat capate de la barele laminate prin eroziune electrică cu rupere de contact. CNTN 6, Timișoara, 1993.
54. Mc Donald, G.N. Who is afraid of EDM. American Machinist, 1 Dez.1989.
55. Moraru, V., Teoria și proiectarea mașinilor-unelte. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985.
56. Nanu, A. Tehnologia materialelor. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
57. Nanu, A., Nanu, D. Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic. Editura Facla, Timișoara, 1981.

58. Nanu, A., Dragomir E., Achimescu N. Stabilirea ordinei de influență a parametrilor reglabili asupra productivității prelucrării prin eroziune electrică a carburilor metalice de tip G – 10. A IV -a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983.
59. Nanu A., Olariu, M. Asupra importanței factorilor de influență în procesul electroeroziv. Zilele Academice Timișene, Ediția a V -a, Timișoara, 1997.
60. Nanu, D. Bazele prelucrării cu energii concentrate. Note de curs. Sibiu, 1996.
61. Nanu, D., ș.a. Protocol contract Întreprinderea Metalurgică Aiud, 1984.
62. Nanu, D., ș.a. Protocol contract Întreprinderea Independența Sibiu, 1985.
63. Nanu, D., ș.a. Protocol contract Întreprinderea Metalurgică Aiud, 1987
64. Nanu, D., Chicea, O., Heber, S., Considerații privind determinarea rezistenței de trecere la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. "Zilele academice Timișene", Timișoara, 1985.
65. Nanu, D., Chicea, O., Heber, S., Aspecte ale dependenței dintre forța de apăsare și rezistența electrică, la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. Revista de tehnologii neconvenționale 1/1997, Timișoara.
66. Nanu, D., Diaconescu, C., Dușe, D., Posibilități de evaluare teoretică a productivității la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. Tehnomus, Suceava, 1987.
67. Nanu, D., Diaconescu, C., Dușe, D., O analiză sub aspect energetic a debitării prin eroziune electrică cu rupere de contact. Buletin Tehnico-științific al IIS Sibiu, Seria Tehnică-matematică, Vol. VII, Sibiu, 1987.
68. Nanu, D., Dușe, D., ș.a. O analiză a procedeelelor aplicabile la debitarea maselelor și rețelelor de turnare la piese turnate din oțeluri bogat aliate. Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrări la cald. Vol I. Brașov 1988.
69. Nanu, D., Dușe, D., Diaconescu, C., Unele considerații privind necesitatea corelării unor parametri la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. Simpozionul Academiei Române "Tehnologii neconvenționale", Timișoara, 1986.
70. Nanu, D., Grünfeld, S., Dușe, D., Nanu, S. Unele considerații teoretice privind prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. În: A IV-a CNTN, Timișoara, 1983.
71. Nanu, D., Diaconescu, C., Dușe, D., Nanu, S. Posibilități de determinare teoretică a unor parametrii la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact. În: A IV-a CNTN, Timișoara, 1983.

72. Nanu, D., Urdaș, D. Studiul microscopic al zonei influențate termic la prelucrarea prin eroziune electrică în câmp magnetic cu electrod-sculă din oțel. În: A III-a Conferință PUPR, Timișoara, 1978.
73. Nanu, D., Sofonea, G., ș.a. Optimizarea elementelor active la debitarea prin eroziune electrică cu rupere de contact cu bandă metalică. A II-a Conferință științifică internațională de mașini și tehnologii moderne, Cugir, 1993.
74. Nanu, D., Trifu, T., ș.a. Sistem de acționare electro-hidraulic pentru instalații de debitat prin eroziune electrică cu rupere de contact, Buletin științific al IIS Sibiu, Vol. 9., 1986.
75. Nanu, D., Dușe, D. Mașină de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact. În: Tehnomus Suceava, 1985.
76. Nanu, D., Dușe, D., ș.a. Utilaj de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact. In: Buletin științific al IIS Sibiu. Seria Tehnică-matematică. Vol. VII, 1986.
77. Nanu, D., Bucur, V., Țițu, M. Sisteme de protecție la utilajele de debitare prin E.E.R.C. cu obiect de transfer bandă metalică., Oradea, 1999.
78. Nanu, D., Țițu, M. Un model fizico-matematic de aplicare a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu câmpuri coercitive. Acta Universitatis Cibinensis, Seria Tehnică, Mecanică Aplicată, Editura Universității "Lucian Blaga" Sibiu, Sibiu, 1996.
79. Nanu, D., Țițu, M. Specialized software for the optimization of the movement parameters, the kinetic energy and the value of the magnetic field intensity during the manufacturing by electric erosion with magnetic field activation. Sesiunea științifică a Institutului Politehnic București, CNMU 98, 1988.
80. Nanu, D., Oprean, C., Țițu, M., Vasiiu, R. O strategie pentru eficientizarea activităților în domeniul tehnologiilor de prelucrare. Acta Universitatis Cibiensis, seria Tehnică, Sibiu, 1998.
81. Nanu, D., Oprean, C., Țițu, M. Program de simulare grafică a mecanismului fizic de prelevare de material la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică. Acta Universitatis Cibiensis, seria Tehnică, Sibiu, 1998.
82. Nanu, D., Oprean, C., Țițu, M., Diaconescu, C. Interactive and specialized software for designing the equipment's needed for magnetic activation of the electric discharge machining process. MATEHN 98, Cluj-Napoca.

83. Nanu, D., Țițu, M., Oprean, C., Țătu, A., Diaconescu, C., Roibu, C. Procedeu și instalație pentru obținerea unor descărcări singulare în impuls electric. Propunere Brevet de Invenție, OSIM, Romania, 2000.
84. Natanail, Carmen, Nanu, D., ș.a. Ștand experimental pentru studiul netezirii suprafețelor prin eroziune electrică cu rupere de contact. PUPR 6, Universitatea Politehnica Timișoara, 1989.
85. Natanail, Carmen, Nanu, D., Diaconescu, C. Cercetări privind dependența parametrilor de rugozitate de viteza relativă la netezirea prin eroziune electrică cu rupere de contact. Tehnomus, Suceava, 1989.
86. Nica, M., ș.a. Unele realizări în domeniul echipamentelor și tehnologiilor de prelucrare prin contact electric. Simpozion de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1986.
87. Nica, M. Travail par contact électrique par la vibration de l'électrode-util. În: A V-a Conferință PUPR, Timișoara, 1986.
88. Nica, M. Contribuții la construcția utilajului, cercetarea procesului și diversificarea aplicării prelucrării prin contact electric. În: A V-a CNTN, Timișoara, 1989.
89. Nica, M., Reviczky, A. Automatizarea ciclului de lucru la debitarea prin contact electric. În: A IV-a Conferința PUPR, Timișoara, 1981.
90. Nica, M., Turc, C. Model experimental pentru perforarea prin rupere de contact electric activată cu ultrasunete. În: Acta Universitatis Cibiniensis, Vol. XVI, Seria Tehnică, B. Tehnologii mecanice și utilaje tehnologice, Sibiu, 1995.
91. Nica, M., Turc, C. Cercetări privind perforarea prin rupere de contact electric activată cu ultrasunete. În: Acta Universitatis Cibiniensis, Vol. XVI, Seria Tehnică, B. Tehnologii mecanice și utilaje tehnologice, Sibiu, 1995.
92. Nichici, A., ș.a. Prelucrarea prin eroziune electrică în construcția de mașini. Editura Facla, Timișoara, 1983.
93. Nichici, A., Popa, H. Analiza energetică-informațională a proceselor de prelucrare prin eroziune. În: A IV-a CNTN, Timișoara, 1983.
94. Nichici, A., Cicală, E., Mee, R. Prelucrarea datelor experimentale – curs și aplicații- Litografia Universității „Politehnica“. Timișoara 1996

95. Nichici, A., Oprea, M., Olariu N., Marinceu D. Le modele statistique du processus d'usinage par erosion électrique a electrode massif. Bul.Științific și tehnic al Institutului Politehnic din Timișoara , Fasc 1 – 2 , 1987.
96. Oprean, A., Bazele generării și așchierii suprafețelor. Editura Didactică și Pedagogică București, 1981.
97. Oprean, C. Contribuții privind optimizarea parametrilor fizici și tehnologici la prelucrările neconvenționale. Prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform. Teză de doctorat, București, 1985.
98. Oprean, C., Țițu, M. Managementul inovațional și al calității. Editura Universității Lucian Blaga Sibiu, ISBN 973-9410-10-3, Sibiu, 1998.
99. Oprean, C., Țițu, M., Nanu, D., Cicală, E. "STATISTIC DATA SYSTEM 2000" - Software universal pentru modelarea, optimizarea și conducerea asistată proceselor tehnologice. Sibiu, 2000.
100. Oprean, C., s.a. Cercetări privind adaptabilitatea unor arhitecturi de referință specifice sistemelor de producție integrată, la cerințele industriei constructoare de mașini și ale învățământului tehnic din România. Contract de cercetare științifică nr. 27/1998 (A). Beneficiar M.E.N., 1998.
101. Ostermann, F., ș.a. Aluminium – Werkstofftechnik für den Automobilbau. Expert – Verlag Esslingen.
102. Pavelescu, D., ș.a. Tribologie. Editura Didactică și Pedagogică București, 1977.
103. Petzow, G. Metallkunde für Ingenieure. Akademischer Verlag. Frankfurt/Main 1970.
104. Ponomariov, D., ș.a. Calculul de rezistență în construcțiile de mașini. Editura Tehnică București, 1963.
105. Popescu, I. Așchieria aliajelor de aluminiu. Editura tehnică. București 1974.
106. Pronco, G., F., Dimitrieva, J., P., Transformarea mașinilor-unelte în mașini prin eroziune electrică. Problemele prelucrării electrice a materialelor. Minsc, Editura Academiei de Științe a URSS, 1962.
107. Rhyner, H. Impulsgeneratoren für die elektroerosive Metallbearbeitung. În: Technische Rundschau, Nr.37, 1965.

108. Roșca, L., Stadiul actual și perspectiva utilizării procedurii de prelucrare prin eroziune electrică cu rupere de contact la netezirea suprafețelor. Referat I, Universitatea Politehnică Timișoara, 1991.
109. Roșca, L., Nanu, D., Roșca, N., Cercetări privind conceperea unui sistem de conducere cu microprocesorul a prelucrării suprafețelor plane prin eroziune electrică cu rupere de contact. Revista de tehnologii neconvenționale, Nr. 1/1997.
110. Rudiger, H. Die funkerosive Bearbeitung-Uberblick und Enwicklungsstand. Maschine nr 28/1974.
111. Rudenko, A., E. Instalație pentru prelucrarea pieselor aparatelor de încărcare a furnalelor. În: Metalurg URSS, Nr.9, 1980.
112. Sălăgean, T., Fenomene fizice și metalurgice la sudarea cu arcul electric a oțelurilor. Editura Academiei Române, 1963.
113. Slătineanu, L., ș.a. Asupra construcției unui dispozitiv pentru debitare prin procedee electrice pe strunguri universale. TEHNOMUS Suceava, 1985.
114. Spur, G., Stoueffler, T Handbuch der Fertigungstechnik. Band 4.1, Abtragen und Beschichten. Hanser-Verlag München, 1987.
115. Stoian, L., ș.a. Tehnologia materialelor. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980.
116. Ștețiu, M., Roșca, N., Țițu, M. Program pentru simularea grafică a proceselor de tăiere liberă a metalelor. Sesiunea de comunicări științifice "Implicarea cercetării științifice în dezvoltarea și modernizarea proceselor de producție", Sibiu, 1995.
117. Schumacher, B., Weckerle, D. Funkerosion. Richtig verstehen und anwenden. Technischer Fachverlag-Velbert.
118. Taloi, D. Optimizarea proceselor tehnologice, aplicații în metalurgie. Editura academeiei RSR. București 1987.
119. Tiron, M. Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare. Editura tehnică. București 1979.
120. Tîran, M., Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare. Editura Tehnică. București, 1979.
121. Tripșa, I., ș.a. Mică enciclopedie de metalurgie. Editura științifică și enciclopedică. București 1980.

122. Țițu, M. Contribuții privind modificarea transferului substanțial la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmpuri coercitive. Teză de doctorat. Sibiu 1998.
123. Țițu, M., Băilă, D., Droc, F. Considerații cu privire la ponderea influenței unor parametri de debitare prin eroziune electrică cu rupere de contact. Tehnologii moderne, calitate, restructurare. Vol 3. Editura TEHNICA-INFO. Chișinău 1999.
124. Țițu, M., Bucur, V., Heber, S. Determinarea statistică a ordinii de influența a variabilelor independente, la prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact (EERC) cu obiect de transfer (OT) –Banda metalică. Analele universității din Oradea, 1999.
125. Țițu, M., Nanu, D. Program de calcul automat pentru modelarea parametrilor de mișcare a purtătorilor de sarcină la prelucrarea prin eroziune electrică cu activare magnetică. CITN, Timișoara, 1997.
126. Țițu, M., Nanu, D., Oprean, C., Țițu, A., Procedeu și instalație pentru activarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu câmpuri magnetice. Propunere Brevet de Invenție/1998. OSIM, Romania, 2000.
127. Vas, A., ș.a. Aplicațiile industriale ale plasmei termice. Editura Facla. Timișoara 1979.
128. Vasile, I., Cădariu, Gh. Tăierea și prelucrarea cu flacără a materialelor metalice. Editura Tehnică. București 1978.
129. Vitlin, V., B., ș.a. Debitarea metalului prin electrocontact de precizie. Stanki I instrument, Nr. 4., URSS, 1977.
130. Velikii, V., I., ș.a. Prelucrarea prin contact electric a oțelurilor greu prelucrabile, Tehnologiia I organizatiia proizvodstva, URSS, 1981.
131. Weck, M. Werkzeugmaschinen. Fertigungssysteme 1. Maschinenarten und Anwendungsbereiche. Springer – Verlag. Berlin.
132. * * * DIN 8580
133. * * * STAS 12640 / 88
134. * * * VDI 3400
135. Zolotych, B.,N. Physikalische Grundlagen der Elektrofunktbearbeitung von Metallen. VEB-VerlagTechnik, Berlin, 1955.
136. *** Manualul Inginerului Mecanic. Vol.III, Editura Tehnică, București, 1972.
137. *** Prospectele firmei AGIE.

138. *** "STATGRAPHICS". Manual de prezentare, SUA, 1996.
139. *** "STATISTIC DATA SYSTEM.2000" Software de modelare, optimizare și conducere asistată a proceselor tehnologice. Sibiu, Universitatea Lucian Blaga Sibiu, Facultatea de Inginerie, Catedra TCM, România, 2000.
140. ***Programa de fabricație a firmei EBSLOH-ALUMINIUM (compoziție, dimensiuni, proprietăți).
141. ***Aluminium Applications for Automative Design SP-1097. Society of Automative Engineerings. Ing 1995.
142. ***Aluminium - Automobil. International Conference – Düsseldorf 1976.
143. ***Automatisieren mit Pneumatic. Catalog FESTO 1997.
144. ***Technische Produkte, Catalog, REIF, 1997.
145. ***Scule, verificatoare, mașini-unelte, Catalog PRECITOOL, 1997.
146. ***SPSS ++. Manual de utilizare. SUA 1997/1999.
147. ***Statistica for Windows. Manual de utilizare. SUA, 2000.